

Návrh a realizace vícepásmové plošné antény

Microstrip Patch Multiband Antenna Design

Bc. Lukáš Broda

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Marek Dvorský, Ph.D.

Ostrava, 2021

Abstrakt

Táto diplomová práca je zameraná na problematiku plošných viacpásmových antén, ktoré je možné uplatniť v praxi pri prevádzke 2x2 MIMO. Praktickým cieľom práce je navrhnuť, optimalizovať a realizovať model viacpásmovej antény, pracujúcej na frekvenciách štandardu 802.11, teda v pásme 2.4 a 5 GHz. Úvodná časť práce zhŕňa teoretické poznatky z oblasti PAN/WAN sietí, plošných antén, a zameriava sa na výber vhodného substrátu spolu s prieskumom momentálnej trhovej ponuky. Ďalej popisuje proces návrhu v simulačnom programe CST Studio a následnú optimalizáciu. V závere sa práca venuje samotnej praktickej realizácii, overeniu správnosti návrhu meraním a celkovému zhodnoteniu práce. Výsledkom návrhu je plne funkčná viacpásmová anténa, ktorá je pripravená na využitie v praxi.

Klíčové slová

802.11; anténa; CST Studio; FR4; LAN; napájanie koaxiálnou sondou; planárna anténa; viacpásmová anténa; WAN; WiFi

Abstract

This diploma thesis is focused on the issue of planar multiband antennas, which can be applied in practice in the operation of 2x2 MIMO. The practical goal of this diploma thesis is to design, optimize and implement a model of a multiband antenna operating on the frequency bands of the 802.11 standard, ie. in the 2.4 and 5 GHz frequency bands. The introduction of the diploma thesis summarizes the theoretical knowledge in the field of PAN/WAN networks, planar antennas and focuses on the choice of a suitable substrate, together with a survey of the current market supply. It also describes the design process in the simulation program CST Studio and subsequent optimization. Finally, the work deals with the actual practical implementation, verification of the correctness of the design by measurement and the overall evaluation of the diploma thesis. The result of the design is a fully functional multiband antenna, which is ready for use in practice.

Keywords

802.11; antenna; coaxial probe feeding; CST Studio; FR4; LAN; multiband antenna; planar antenna; WAN; WiFi

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval Ing. Marekovi Dvorskému, Ph.D. za odbornú pomoc a konzultácie pri vytváraní tejto diplomovej práce.

Obsah

Zoznam použitých symbolov a skratiek	6
Zoznam obrázkov	8
Zoznam tabuliek	11
1 Úvod	12
2 Siete typu PAN/WAN	14
2.1 Technológie PAN sietí	15
2.2 Technológie WAN sietí	17
3 Štandard 802.11	22
3.1 802.11b	22
3.2 802.11a	23
3.3 802.11g	23
3.4 802.11n	23
3.5 802.11ac	24
3.6 802.11ad	24
3.7 802.11ax	25
3.8 802.11ay	25
3.9 802.11be	25
4 Planárne antény	26
4.1 Základný popis	26
4.2 Výhody a nevýhody planárnych antén	27
4.3 Typy planárnych antén	28
4.4 Konštrukcia planárnych antén	31
4.5 Napájanie planárnych antén	33
4.6 Vyžarovanie planárnych antén	38

4.7	Viacpásmové planárne antény	40
5	Dielektrické substráty	43
5.1	Vlastnosti dielektrických substrátov	43
5.2	Vplyv vlastností substrátu na planárnu anténu	44
5.3	Výber vhodného dielektrického substrátu	44
6	Návrh, simulácia a optimalizácia antény	47
6.1	CST Studio	47
6.2	Návrh antény	48
6.3	Modelovanie a simulácia v nástroji CST Studio	51
6.4	Optimalizácia návrhu	55
6.5	Využitie antény v prevádzke 2x2 MIMO	71
7	Praktická realizácia	76
7.1	Výroba antény	76
7.2	Overenie správnosti návrhu meraním	78
7.3	Výsledky merania	78
7.4	Meranie zisku vybraných antén	83
8	Záver	86
	Literatura	88
	Obsah elektronickej prílohy	92
	Prílohy	92
A	Vyžarovacie charakteristiky	93
B	Dokončené modely antén	102
C	Grafy nameraných hodnôt	105
D	Meracie stanovisku zisku	110
E	Technický náčrt oboch modelov antén	112

Zoznam použitých skratiek a symbolov

3GPP	– The 3rd Generation Partnership Project
BER	– Bit error rate
CCK	– Complementary code keying
CLIP	– Calling line identification presentation
CLIR	– Calling line identification restriction
CNC	– Computer numerical control
CSMA/CA	– Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DPS	– Doska plošných spojov
DSSS	– Direct-sequence spread spectrum
EGSM	– Extended GSM
EU	– Európa
FDD	– Frequency division duplex
FDMA	– Frequency-division multiple access
FSHS	– Frequency-shift keying
FSK	– Frequency-shift keying
GFSK	– Gaussian frequency-shift keying
GSM	– Global System for Mobile Communications
IEEE	– Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	– Internet of things
ISM	– Industrial, scientific and medical
LTE	– Long Term Evolution
MAHO	– Mobile assisted handoff
MIMO	– Multiple-input and multiple-output
MU-MIMO	– Multi user Multiple-input and multiple-output
OFDM	– Orthogonal frequency-division multiplexing
OFDMA	– Orthogonal frequency-division multiple access
OQPSK	– Offset quadrature phase-shift keying
PAN	– Personal area network

PBG	– Photonic-bandgap
PCB	– Printed circuit board
PSK	– Phase-shift keying
PSV	– Pomer stojatých vln
PTFE	– Polytetrafluóretylén
QAM	– Quadrature amplitude modulation
QPSK	– Quadrature phase-shift keying
RFID	– Radio Frequency IDentification
SC-FDMA	– Single-carrier FDMA
TDD	– Time division duplex
UMTS	– Universal Mobile Telecommunications System
VF	– Vysokofrekvenčný/á/é
VoLTE	– Voice over LTE
WAN	– Wide area network
XR	– X reality

Zoznam obrázkov

2.1	Delenie sietí podľa rozlohy	14
2.2	Porovnanie sietí 5. a 6. generácie	21
3.1	Kanály štandardu 802.11b[16]	23
3.2	Princíp MIMO/MU-MIMO	24
4.1	Najčastejšie tvary fliačkových antén[27]	28
4.2	Planárny dipól[30]	29
4.3	Motýliková anténa[30]	30
4.4	Štrbinová anténa[30]	30
4.5	Základne tvary antén s postupnou vlnou[30]	31
4.6	Konštrukcia planárnej antény[26]	32
4.7	Napájanie mikropásikovým vedením[30]	33
4.8	Napájanie mikropásikovým vedením väzbou cez medzeru[30]	34
4.9	Priame vsunuté mikropásikové napájanie[30]	34
4.10	Aproximačný model mikropásikového napájania[30]	35
4.11	Princíp napájania koaxiálnou sondou[26]	35
4.12	Aproximačný model napájania koaxiálnou sondou[30]	36
4.13	Princíp napájania viazaného apertúrou[30]	37
4.14	Aproximačný model napájania viazaného apertúrou	37
4.15	Princíp napájania blízkym polom[30]	38
4.16	Aproximačný model napájania blízkym polom[30]	38
4.17	Nábojové rozloženie a prúdová hustota na mikropásiku[30]	39
4.18	Rozloženie prúdovej hustoty na nevyžarujúcich štrbinách[27]	40
6.1	Prvotný návrh antény	52
6.2	Parameter S_{11} prvotného návrhu	53
6.3	Upravený prvotný návrh antény	53
6.4	Parameter S_{11} upraveného prvotného návrhu	54

6.5	PSV upraveného prvotného návrhu	54
6.6	Znázornenie úpravy meandru	56
6.7	Znázornenie úpravy meandru premietnuté do grafu S_{11}	56
6.8	Znázornenie úpravy mikropásiku tvaru L	57
6.9	Znázornenie úpravy mikropásiku tvaru L premietnuté do grafu S_{11}	57
6.10	Model antény po dokončení úprav na hornej strane substrátu	58
6.11	Znázornenie úpravy výšky zemiacej roviny	58
6.12	Znázornenie úpravy výšky stredového tvaru zemiacej roviny	59
6.13	Rozšírenie pásma znázornené v grafe S_{11}	59
6.14	Znázornenie úpravy štrbín zemiacej roviny	60
6.15	Znázornenie úpravy štrbín zemiacej roviny premietnuté do grafu S_{11}	60
6.16	Graf parametru S_{11} optimalizovaného modelu č. 1	61
6.17	Graf PSV optimalizovaného modelu č. 1	62
6.18	Rozmery optimalizovaného modelu č. 1	62
6.19	3D vyžarovací diagram 2450 MHz (model č. 1)	63
6.20	3D vyžarovací diagram 5512.5 MHz (model č. 1)	64
6.21	Smerová charakteristika 2450 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 1)	64
6.22	Smerová charakteristika 5512.5 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 1)	65
6.23	Graf parametru S_{11} optimalizovaného modelu č. 2	66
6.24	Graf PSV optimalizovaného modelu č. 2	66
6.25	Rozmery optimalizovaného modelu č. 2	67
6.26	3D vyžarovací diagram 2450 MHz (model č. 2)	68
6.27	3D vyžarovací diagram 5512.5 MHz (model č. 2)	68
6.28	Smerová charakteristika 2450 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 2)	69
6.29	Smerová charakteristika 5512.5 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 2)	69
6.30	Porovnanie parametru S_{11} oboch modelov antén	70
6.31	Porovnanie parametru PSV oboch modelov antén	70
6.32	Znázornenie princípu MIMO	71
6.33	Parameter S_{21} modelov č. 1	72
6.34	Usporiadanie modelov č. 1 v nástroji CST Studio	73
6.35	Parameter S_{21} modelov č. 2	74
6.36	Usporiadanie modelov č. 2 v nástroji CST Studio	74
6.37	Porovnanie parametru S_{21} pre obe usporiadania	75
7.1	Proces frézovania antén	77
7.2	Ukážka opracovanej antény (model 1a)	77
7.3	Graf nameranej hodnoty parametru S_{11} pre model č. 1	80
7.4	Graf nameranej hodnoty parametru PSV pre model č. 1	81

7.5	Graf nameranej hodnoty parametru S_{11} pre model č. 2	82
7.6	Graf nameranej hodnoty parametru PSV pre model č. 2	82
A.1	3D vyžarovací diagram 2400 MHz (model č. 1)	93
A.2	Smerová charakteristika 2400 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 1)	94
A.3	3D vyžarovací diagram 2500 MHz (model č. 1)	94
A.4	Smerová charakteristika 2500 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 1)	95
A.5	3D vyžarovací diagram 5150 MHz (model č. 1)	95
A.6	Smerová charakteristika 5150 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 1)	96
A.7	3D vyžarovací diagram 5875 MHz (model č. 1)	96
A.8	Smerová charakteristika 5875 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 1)	97
A.9	3D vyžarovací diagram 2400 MHz (model č. 2)	97
A.10	Smerová charakteristika 2400 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 2)	98
A.11	3D vyžarovací diagram 2500 MHz (model č. 2)	98
A.12	Smerová charakteristika 2500 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 2)	99
A.13	3D vyžarovací diagram 5150 MHz (model č. 2)	99
A.14	Smerová charakteristika 5150 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 2)	100
A.15	3D vyžarovací diagram 5875 MHz (model č. 2)	100
A.16	Smerová charakteristika 5875 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 2)	101
B.1	Modely pripravené na overenie meraním (horná časť antén)	103
B.2	Modely pripravené na overenie meraním (dolná časť antén)	104
C.1	Graf nameranej hodnoty parametru S_{11} pre model č. 1	106
C.2	Graf nameranej hodnoty parametru PSV pre model č. 1	107
C.3	Graf nameranej hodnoty parametru S_{11} pre model č. 2	108
C.4	Graf nameranej hodnoty parametru PSV pre model č. 2	109
D.1	Ukážka merania zisku	111
E.1	Technický náčrt modelu č. 1	113
E.2	Technický náčrt modelu č. 2	114

Zoznam tabuliek

6.1	Minimálne požiadavky na navrhovanú anténu	49
7.1	Výsledky merania parametru S_{11} modelu č. 1	78
7.2	Výsledky merania parametru PSV modelu č. 1	79
7.3	Výsledky merania parametru S_{11} modelu č. 2	79
7.4	Výsledky merania parametru PSV modelu č. 2	79
7.5	Namerané hodnoty zisku vybraných antén	84

Kapitola 1

Úvod

V súčasnej dobe, kedy bezdrôtové technológie zažívajú veľký rozmach je výber správnej antény jeden z kľúčových faktorov. Za posledných 30 rokov došlo k rozšíreniu bezdrôtových technológií takpovediac do všetkých oblastí priemyslu, ale i bežného života. K dispozícii máme rôzne štandardy, ktoré sú určené na viaceré oblasti použitia a využívajú, ale i zdieľajú rôzne frekvenčné pásma. Bezdrôtový prenos tak postupne dokáže ponúknuť rovnakú spoľahlivosť a častokrát i vyššiu prenosovú rýchlosť, ako klasický prenos po pevnom médiu. S týmto sa následne spája problematika súvisiaca s návrhom a výrobou správnej antény. Tie musia byť schopné pracovať v potrebných frekvenčných pásmach a svojimi vlastnosťami zabezpečiť spoľahlivý prenos. So stále vyvíjajúcimi sa štandardmi taktiež rastie potreba využívať nové frekvenčné pásma s čím priamo úmerne súvisia počty antén, ktoré je potrebné použiť na koncovej strane. Keďže v priemysle, ale i domácnosti sa nevyužíva len jedna technológia v konečnom dôsledku je potrebné použiť veľké množstvo antén, čo je veľa krát nepraktické a odráža sa to i na finančnej stránke. Riešenie tohoto problému môže byť použitie viacpásmovej antény, ktorá je teda schopná pracovať v rôznych pásmach a nahradiť tak väčšie množstvo iných antén. Na druhú stranu návrh takejto antény je zložitejší a náročnejší na optimalizáciu. Veľmi dôležitý je taktiež vhodný výber substrátu, ktorý vo veľkej miere ovplyvní výsledne vlastnosti antény. Rôzne technológie si vyžadujú rôzne veľkosti antén a preto vhodným výberom sú často plošné antény, ktoré je možné realizovať v rôznych tvaroch i veľkostiach. Vďaka tomuto faktoru, ale i svojej relatívne nízkej cene nachádzajú využitie v leteckom priemysle, vojenskom odvetí, nájdeme ich však i v mobilných telefónoch, ale i ako panelové RFID (Radio Frequency IDentification) antény atď. Veľká výhoda tiež spočíva v možnosti úpravy smerovosti presne podľa potreby danej technológie. Samozrejme s týmto typom antén sa spájajú i problémy, ako malý zisk pri menších rozmeroch a relatívne malá účinnosť.

Táto práca sa venuje práve problematike návrhu viacpásmovej plošnej antény, ktorú je možné využiť na frekvenciách štandardu 802.11. V prvej časti práce, ktorá sa venuje teoretickým základom, sú zhrnuté PAN/WAN (Personal area network/Wide area network) siete s ohľadom na súčasné, ale i do budúcnosti plánované frekvenčné pásma. Nasleduje základný popis planárnych antén ako

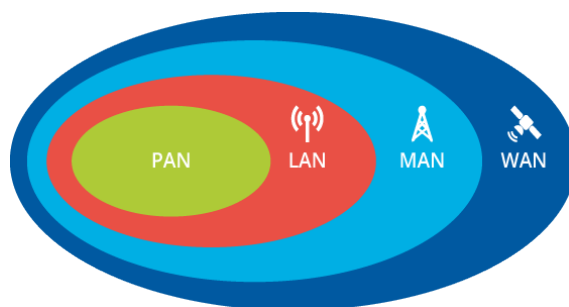
takých, časť je taktiež venovaná plošným anténam a ich teoretickému popisu. Následne je volený vhodný substrát v závislosti na požadovaných vlastnostiach antény. Čas je venovaný i zhrnutiu momentálnej trhovej ponuky. Ďalej sa práca venuje návrhu v simulačnom programe CST Studio, kde je uvedený podrobný popis návrhu i optimalizácie antény. Nasleduje časť venovaná výrobe a overeniu vyrobenej antény meraním, spolu so zhodnotením, či už správnosti postupu, alebo nameraných hodnôt. Práca sa zameriava i na možnosti použitia antény v prevádzke 2x2 MIMO (Multiple-input and multiple-output). Praktickým výsledkom tejto práce je postup návrhu daného typu antény, spolu s vyrobeným modelom schopným fungovať v ostrej prevádzke.

Kapitola 2

Siete typu PAN/WAN

Počítačovou sieťou nazývame súhrn prostriedkov, pomocou ktorých realizujeme spojenie a výmenu informácií medzi zariadeniami. Tieto prostriedky podľa určitých pravidiel umožňujú komunikáciu, zdieľanie spoločných zdrojov, alebo výmenu správ. Spojenie medzi jednotlivými zariadeniami môže byť realizované viacerými spôsobmi, základné sú však 3 princípy a to spojenie metalickým vedením, optickým vedením, alebo bezdrôtovo. Počítačové siete môžeme deliť podľa veľkého množstva rôznych hľadísk. V tomto prípade však bude kľúčové delenie podľa rozlohy siete a to na:

- Personal Area Network - PAN
- Local Area Network - LAN
- Metropolitan Area Network - MAN
- Wide Area Network - WAN



Obr. 2.1: Delenie sietí podľa rozlohy

PAN, ako už z názvu vyplýva je osobná počítačová sieť, ktorá je tvorená komunikujúcimi zariadeniami, ako mobilný telefón, laptop, smart hodinky a podobne. Tieto zariadenia sa obvykle nachádzajú v blízkosti jedenej osoby a dosah takéhoto typu siete je typicky niekoľko metrov. Primárne tento typ siete slúži na zabezpečenie komunikácie zariadení samotných, prípadne na pripojenie k okolitým sieťam, alebo Internetu. I v tomto prípade je spojenie zabezpečené buď drôtovo, alebo

naopak bezdrôtovo. V súčasnosti sa však pri tomto type sietí primárne využíva technológia bezdrôtová, hlavne kvôli pohodlnosti užívateľa, praktickosti a častokrát i vyšším prenosovým rýchlostiam.

WAN, na rozdiel o sietí typu PAN, pokrýva rozľahlé geografické územia, typicky celé regióny, alebo štáty. WAN siete sú využívané pre spojenie menších LAN sietí, čo umožňuje komunikáciu užívateľov z rôznych miest. Množstvo WAN sietí sú súkromné a vybudované súkromnými spoločnosťami. Siete tohto typu bývajú často vybudované na prenajatých linkách a ich prevádzka je veľmi nákladná. I v tomto prípade môže byť spojenie zabezpečené buď drôtovo, alebo bezdrôtovo. Najznámejší príklad WAN siete je internet samotný.

2.1 Technológie PAN sietí

Ako bolo spomenuté v predchádzajúcej kapitole, pri tomto type sietí môže byť prepojenie zabezpečené drôtovo, alebo bezdrôtovo. Táto kapitola bude primárne zameraná na bezdrôtové technológie operujúce primárne v pásme 2.4, prípadne 5 GHz, ktoré spadajú od siete typu PAN, s dôrazom na frekvenčné pásma a počty kanálov. Pre predstavu využitia rôznych pásiem bude spomenutá i technológia, ktorá v spomínaných dvoch pásmach neoperuje. Každá spomenutá technológia je definovaná iným štandardom, sú pre ňu špecifické iné frekvenčné pásma, počet kanálov, princíp fungovania i konečné využitie. Najznámejšie a zároveň najpoužívanéjšie technológie, s ktorými sa môžeme stretnúť sú:

- WiFi,
- Bluetooth,
- ZigBee,
- UWB,
- Z-Wave.

Keďže cieľ tejto práce je navrhnúť anténu, ktorá je schopná pracovať v rámci štandardu 802.11, bude z toho dôvodu štandardu 802.11 venovaná samostatná kapitola, kde budú popísané i jeho jednotlivé verzie.

2.1.1 Bluetooth

Bluetooth je štandard bezdrôtovej technológie slúžiaci na prenos údajov a komunikáciu medzi koncovými zariadeniami na krátku vzdialenosť s cieľom minimalizovať nekompatibilitu rôznych typov rozhraní. Technológiu Bluetooth môžeme v stručnosti charakterizovať v nasledujúcich bodoch:

- štandard IEEE 802.15.1 z roku 1989, ako bezdrôtová alternatíva sériovej RS232 linky,
- možnosť implementovania do takmer do ľubovoľného zariadenia,

- verzia 5.2 (bezpečnosť, vyššie rýchlosti (2 MB/s), nízka spotreba, spätná kompatibilita),
- veľké rozšírenie v bežne dostupných zariadeniach s možnosťou pripojenia viacerých zariadení,
- nevýhody ako menší dosah, či nižšia prenosová rýchlosť,
- ISM pásmo 2.4 GHz (2.400 - 2.4835 GHz) v EU (mimo FR a ES) i vo väčšine zemí sveta,
- 79 kanálov o šírke 1 MHz, dolné ochranné pásmo o šírke 2 MHz, horné o šírke 3.5 MHz,
- nosné dané vzťahom $f = 2402 + k[\text{MHz}]$, $k = 0, \dots, 78$,
- nízke vysielacie výkony, rozdelenie do troch výkonových tried,
- metóda frekvenčného skákania nosnej tzv. Frequency Hopping v rozostrenom spektre (FHSS),
- 1600s^{-1} nominálny počet preskokov,
- časový multiplex s time slotmi o dĺžke $625 \mu\text{s}$ a moduláciou GFSK,
- citlivosť -70 dBm pri chybovosti $BER \leq 10^{-3}$,
- maximálny využiteľný prijímaný výkon -20 dBm.[1][2]

2.1.2 ZigBee

Zigbee je technológia určená pre spojenie nízkoenergetických zariadení, typicky do vzdialenosti 75 metrov, v ideálnych prípadoch až do 1500 metrov. V krátkosti túto technológiu môžeme popísať v nasledujúcich bodoch:

- štandard IEEE 802.15.4 z roku 2002,
- multiskokové ad-hoc smerovanie,
- využitie pre priemyselné aplikácie, automatizáciu, senzorové siete,
- maximálna jednoduchosť protokolov, nutnosť implementácie do 8 bitových mikrokontrolérov,
- dôraz na nízku spotrebu, spoľahlivosť, nízku latenciu a jednoduchosť,
- symetrické šifrovanie 128 bitovým kľúčom, maximálna rýchlosť 250 kbit/s,
- celosvetové využitie ISM pásma 2.4 GHz (2405 – 2480 MHz),
- taktiež 868 MHz (868 – 868.6 MHz) v rámci EU, 915 MHz (902 – 928 MHz) v rámci Ameriky,
- 27 kanálov rozdelené medzi jednotlivé pásma,
- pásmo 2.4 GHz rozdelené na 16 kanálov s odstupom 5 MHz a šírkou 2 MHz, citlivosť -85 dBm,
- pásmo 868 MHz obsahuje jediný kanál so šírkou 0.6 MHz,
- pásmo 915 MHz rozdelené na 10 kanálov s odstupom 2 MHz, citlivosť -92 dBm,
- maximálna prenosová rýchlosť 20 Kb/s (868 MHz), 40 Kb/s (915 MHz), 250 Kb/s (2.4 GHz)
- OQPSK modulácia pre pásmo 2.4 GHz, inak BPSK.[3][4][4]

2.1.3 UWB

Ultra-Wideband je bezdrôtová technológia, ktorá umožňuje širokopásmovú komunikáciu na krátku vzdialenosť, pri využití veľkej časti spektra a zároveň pri nízkej úrovni energie. Charakteristické črty tejto technológie sú:

- prevažné využitie pre zber dát zo senzoru, lokalizačné aplikácie, prenos dát,
- postupná dostupnosť i v mobilných zariadeniach,
- využitie širokého frekvenčného pásma, minimálne 500 MHz, resp. 20 % stredu kanálu,
- i napriek širokopásmovosti, bez rušenia iných úzkopásmových technológií,
- vysielanie v krátkych pulzoch o dĺžke 1 až 2 nanosekundy,
- bez presnej definície frekvenčného pásma, využíva sa však primárne 3.1 až 10.6 GHz,
- prenos vysielaním, ktoré je generované v určitý čas a zaberá široké frekvenčné pásmo,
- využitie pulzne pozičnej modulácie, dosah závislý od frekvencie (max. niekoľko metrov),
- extrémne nízke vysielacie výkony, primárne pre vnútorné použitie. [5]

2.1.4 Z-Wave

Z-Wave je bezdrôtová komunikačná technológia z roku 1999, ktorá je určená pre inteligentné domy, spotrebiče, okná, a iné obdobné zariadenia. Obdobne ako iné, i túto technológiu môžeme charakterizovať v nasledujúcich bodoch:

- topológia typu mesh, možnosť komunikácie i na vyššie vzdialenosti,
- pripojenie až 232 zariadení, každé napájané zariadenie sa správa i ako repeater,
- dosah v ideálnych podmienkach až 600 metrov,
- veľmi nízka spotreba energie, podpora Plug & Play, nízka odozva,
- využitie ISM pásma 915 MHz v rámci Ameriky a Ázie,
- využitie ISM pásma 868 MHz v rámci EU s tromi kanálmi,
- 869.85 MHz so šírkou kanálu 400 kHz a maximálnou rýchlosťou 100 kb/s s moduláciou GFSK,
- 868.40 MHz so šírkami kanálov 300 kHz a max. rýchlosťami 40 a 9.6 Kb/s s moduláciou FSK,
- citlivosť na úrovni -100 dBm.[6]

2.2 Technológie WAN sietí

Siete typu WAN, ako už bolo spomenuté, je typ sietí, ktoré slúžia na pokrytie veľkého geografického územia. V súčasnosti sa za najznámejšie siete typu WAN považujú mobilné siete, s ktorými sa

každodenne stretávame. V poslednej dobre sa však do popredia dostávajú i siete typu LP-WAN (low-power wide-area network), ktoré sú typické nízkou spotrebou. I v tomto prípade platí, že jednotlivé technológie sa odlišujú špecifickými frekvenciami, princípom fungovania, počtom kanálov, maximálnymi rýchlosťami i konečným využitím. Technológie, s ktorými sa môžeme stretnúť sú napr.:

- NB-IoT,
- LoRaWAN,
- Mobilné siete.

2.2.1 NB-IoT

NB-IoT, alebo i Narrowband IoT (Internet of things) je nízko-výkonová úzkopásmová rádiová technológia, popísaná v 3GPP, ktorá umožňuje pripojenie širokého spektra rôznych zariadení. Charakteristické črty tejto technológie sú:

- dosah až 20 km a spoľahlivé pokrytie i vo vnútri budov, využitie už známeho štandardu LTE,
- poskytnutie pripojenia zariadeniam s nízkou priepustnosťou a nízkou citlivosťou,
- nízka energetická náročnosť, nízke náklady,
- využitie OFDMA pre polo-duplexnú komunikáciu v smere downlink v kombinácii s QPSK,
- využitie SC-FDMA v kombinácii s $\pi/4 - QPSK$, $\pi/2 - QPSK$ a QPSK pre smer uplink,
- maximálna prenosová rýchlosť 127 kb/s v smere down, 159 kb/s v smere up,
- v rámci EU využitie LTE pásma B3 (1800 MHz), B8 (900 MHz) a B20 (800 MHz),
- maximálna šírka pásma 200 kHz, maximálny vysielací výkon 23 dBm. [7][8]

2.2.2 LoRaWAN

LoRaWAN je jedna z ďalších nízko-výkonových WAN rádiových technológií, ktorá je určená pre bezdrôtový prenos dát najmä v oblasti IoT. V stručnosti ju možno charakterizovať:

- celosvetovo rozšírený štandard,
- v rámci EU využitie ISM pásma 868 MHz s 10 kanálmi,
- 8 kanálov ponúka prenosové rýchlosti od 250 b/s do 5.5 kb/s,
- jeden vysokorýchlostný kanál s rýchlosťou 11 kb/s,
- samostatný (G)FSK kanál s rýchlosťou 50 kb/s,
- 125 kHz šírka kanálov 0-7 s možnosťou voľby stredovej frekvencie,
- kanál 8 s možnosťou voľby stredovej frekvencie a šírky pásma 125, 250, alebo 500 kHz,
- kanál 9 s možnosťou voľby šírky pásma a najvyššou prenosovou rýchlosťou.[9]

2.2.3 Mobilné siete

Mobilná sieť je typ rádiovkej telekomunikačnej siete, v ktorej je komunikácia na veľké geografické vzdialenosti zabezpečovaná množstvom základových staníc. Vývoj mobilných sietí prešiel mnohými etapami a dnes máme k dispozícii už piatu generáciu. V súčasnosti sa však pomaly začína pracovať i na generácii šiestej. K dispozícii máme generácie 2 až 5, avšak najviac využívané sú práve druhá a štvrtá generácia. Generácia číslo tri je postupne vypínaná a uvoľňuje tak frekvenčné pásma pre iné technológie, primárne pre 5G.

Sieť druhej generácie teda GSM (Global System for Mobile Communications), priniesla ako digitálny systém mobilnej telefónie rôzne novinky i služby na výšenie komfortu samotných užívateľov. V súčasnosti sa jedná o najrozšírenejší štandard s najväčším pokrytím, ktorý je využívaný nielen u nás, ale i po celom svete. Charakteristické rysy toho štandardu okrem iného sú:

- podpora SMS, dátových prenosov, nových služieb CLIP a CLIR,
- využitie šifrovania, autentifikácie a riadenia výkonu,
- podržanie hovoru, konferenčné hovory, MAHO (Mobile assisted handoff) handover,
- 900 a 1800 MHz pásmo v rámci Európy,
- 2 vysielacie pásma so šírkou 25 MHz (890-915 MHz uplink, 935-960 MHz downlink),
- rozšírenie pásma o 10 MHz v rámci EGSM (Extended GSM),
- 124, resp. 174 dostupných kanálov o šírke 200 kHz v pásme 900 MHz,
- 374 kanálov v pásme 1800 MHz (1805–1880 MHz uplink, 1710–1785 MHz downlink),
- GMSK modulačná technika. [10]

Keďže **sieť tretej generácie** sa pomaly vytráca a postupne dôjde k jej úplnému vypnutiu popis tejto siete bude vynechaný. Spomenieme len hlavné ciele technológie UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), ktoré teda boli:

- zvýšenie prenosovej rýchlosti,
- podpora celosvetovej mobility,
- podpora multimédií v reálnom čase, flexibilita pri zavádzaní nových služieb,
- bezproblémová konvergencia služieb poskytovaných v pevných i mobilných sieťach.[10]

Ešte donedávna najmladší štandard **siete štvrtej generácie**, označený ako LTE (Long Term Evolution) vznikol so zámerom poskytnúť novú rádiovú technológiu určenú výhradne pre vysokorýchlostný mobilný internet. Oproti svojim predchodcom sieť prináša radu zmien a noviniek, ktoré dokopy predstavujú novú kapitolu mobilnej komunikácie. Štvrtú generáciu môžeme v stručnosti charakterizovať v nasledujúcich bodoch:

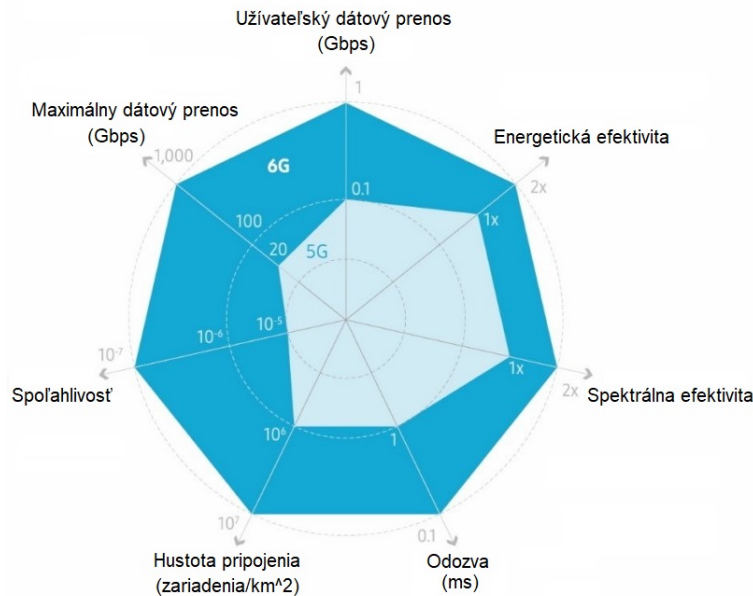
- podpora zásadne paketových služieb, výrazne vyššia prenosová rýchlosť a zníženie odozvy,
- vylepšenie spektrálnej účinnosti, využitie OFDM a zníženie interferencií,
- 66 globálne dostupných pásiem, využitie TDD, alebo FDD,
- 1 (2100 MHz), 3 (1800 MHz), 7 (2600 MHz), 8 (900 MHz), 20 (800 MHz) pásma v ČR,
- flexibilná šírka pásma (od 1.25 MHz do 20 MHz),
- QPSK, 16QAM, alebo 64QAM modulácia,
- podpora VoLTE, MIMO.[10]

Sieť piatej generácie sa stáva čoraz rozšírenejšou a postupne tak nahradzuje svojho predchodcu. Ako to už býva zvykom, i táto generácia prináša radu zmien a vylepšení. Hlavným prínosom je významné zníženie odozvy a až desaťnásobné navýšenie prenosovej rýchlosti. Piata generácia teda v stručnosti prináša:

- možnosť diaľkového ovládania zariadení,
- vysoká kvalita multimédií,
- využitie v robotike, priemysle, rozšírenej realite, autonómnych vozidlách, či internete vecí,
- prenosová rýchlosť až 20 Gbit/s s odozvou pod 1 milisekundu,
- 2 frekvenčné oblasti (pásma pod 6 GHz a nad 24 GHz tzv. milimetrové vlny),
- 53 globálne dostupných pásiem v oblasti pod 6 GHz so šírkou kanálu od 5 do 100 MHz,
- 5 globálne dostupných pásiem v oblasti nad 24 GHz so šírkou kanálu od 50 do 400 MHz,
- v oblasti milimetrových vln pre EU dostupné jedno pásmo (24.25–27.5 GHz),
- využitie modulácie PSK a QAM,
- OFDM s maximálnym počtom subnosných 3300,
- využitie OFDM s odstupom subnosných 15, 30 a 60 kHz pre pásmo pod 6 GHz,
- využitie OFDM s odstupom subnosných 60, 120 a 240 kHz pre pásmo nad 24 GHz,
- podpora MIMO a beamformingu.[11][12]

V súčasnosti i napriek tomu, že sieť piatej generácie je stále v štádiu výstavby, pomaly sa začína pracovať i na **sieti generácie šiestej**. O tejto generácii toho zatiaľ mnoho nevieme, pretože myšlienka je veľmi mladá, avšak z dostupných zdrojov zatiaľ vieme šiestu generáciu charakterizovať:

- predpokladané ostré nasadenie v rokoch 2035 – 2040,
- prenosová rýchlosť 95 Gbit/s, v určitých prípadoch až 1000 Gbit/s,
- odozva maximálne 100 μ s, v určitých prípadoch i pod 1 μ s,
- využitie pásma 90 GHz až 3 THz,
- využitie technológií ako GFDM, FBMC, UFMC,
- využitie zatiaľ neznámych metód viacnásobného prístupu,
- použitie modulácií QAM a APSK,
- flexibilne duplexný režim (frekvencie a čas je závislý na aktuálnej záťaži),
- nový duplexný režim umožňujúci simultánne vysielanie na jednom kanáli,
- využitie tzv. edge computingu,
- využitie v XR aplikáciách, mobilných hologramoch, digitálnych replikách atď.[13][14]



Obr. 2.2: Porovnanie sietí 5. a 6. generácie

Kapitola 3

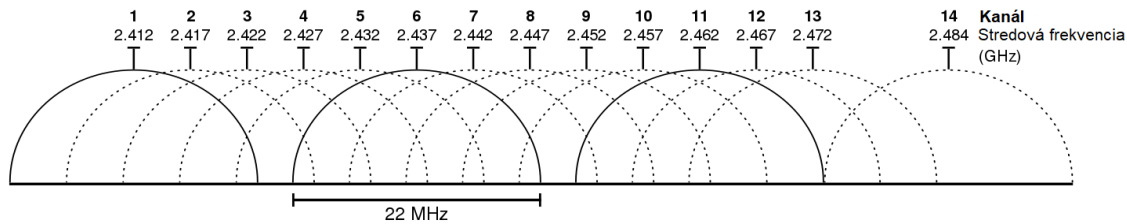
Štandard 802.11

Navrhovaná anténa, ktorá je výsledkom tejto práce bude predovšetkým určená pre štandard 802.11. Táto kapitola bude teda v stručnosti zameraná práve na technológie štandardu 802.11, primárne s ohľadom na frekvenčné pásma, počty kanálov a prenosové rýchlosti.

So štandardom 802.11, i keď to tak na prvý pohľad nemusí vyzeráť, prichádzame do kontaktu doslova každý deň. IEEE 802.11 je štandard popisujúci bezdrôtovú komunikáciu v sieťach typu LAN. Inými slovami jedná sa o štandard, ktorý popisuje veľmi dobre známu technológiu Wi-Fi. So štandardom 802.11 sa stretávame už od roku 1997. Od tej doby prešiel mnoho úpravami a verziami až sa dostal na svoju súčasnú verziu a to 802.11ay. V súčasnosti sa jedná o najrozšírenejší štandard a technológiu Wi-Fi môžeme nájsť vo veľkom množstve zariadení, ktorým umožňuje vzájomnú komunikáciu. Štandard v závislosti na verzii využíva primárne ISM frekvenčné pásma, čo robí technológiu veľmi dostupnú. Veľká výhoda je aj v zaistení spätnej kompatibility. Pre prístup k spoločnému médiu sa využíva metóda CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance), samotná komunikácia medzi zariadeniami prebieha na polo duplexnom princípe.

3.1 802.11b

Štandard 802.11b z roku 1999, označovaný aj ako Wi-Fi 2, pracuje v bezlicenčnom frekvenčnom ISM pásme 2.4 GHz. 802.11b definuje 14 kanálov, avšak posledný 14. kanál je využívaný výlučne v Japonsku. Frekvenčne sa pohybujeme v pásme 2401-2495 MHz (so 14. kanálom). Odstup medzi jednotlivými kanálmi dosahuje 5 MHz. Šírka kanálu je nastavaná na 22 MHz, čo má za následok výrazné prekrývanie určitých kanálov. Technológia využíva moduláciu CCK (Complementary code keying), ktorá vychádza z techniky DSSS. Maximálny povolený výkon sa pohybuje na úrovni 18 dBm, čomu zodpovedá 63 mW. Štandard i napriek svojmu veku je stále podporovaný veľkým množstvom zariadení a dosahuje maximálnu prenosovú rýchlosť až 11 Mb/s.[15][16]



Obr. 3.1: Kanály štandardu 802.11b[16]

3.2 802.11a

Štandard 802.11a, spolu so štandardom 802.11b nadväzuje na predchodcu 802.11. Štandard prináša výrazný nárast prenosovej rýchlosti až na 54 Mb/s. Novinkou je využitie OFDM, ktoré využíva 52 subnosných, z ktorých je 48 určených na prenos dát a 4 sú využívané ako pilotné. Odstup medzi jednotlivými nosnými je 0.3125 MHz. Celkovú šírku kanálu teda tvorí 20 MHz, z ktorých časť 3.4 MHz tvorí ochranné pásmo. Veľkou zmenou je taktiež využitie frekvenčné pásmo. Využíva sa bezlicenčné U-NII 5 GHz pásmo, kedy počet kanálov je závislý od konkrétnej oblasti. V Európe je k dispozícii pásmo 5150 – 5875 MHz, ktoré ponúka viac ako 50 kanálov. Zmena nastáva i v oblasti maximálneho povoleného výkonu, ktorého hodnota je závislá od miesta použitia a konkrétneho kanálu. [16][17]

3.3 802.11g

802.11g bol uvedený v roku 2003 a jedná sa o rozšírenie predchádzajúceho štandardu 802.11b. Hlavnou zmenou je využitie OFDM v kombinácii s moduláciami BPSK, QPSK, 16-QAM, alebo 64-QAM, čo umožnilo maximálnu prenosovú rýchlosť až 54 Mb/s. Využíva sa totožná konfigurácia OFDM ako pri štandarde 802.11a, avšak ochranné pásmo je o niečo širšie z dôvodu šírky kanálu 22 MHz. Rozdelenie kanálov je teda totožné ako v prípade 802.11b. Samozrejmosťou je i kompatibilita s 802.11b. Maximálny povolený výkon sa pohybuje na úrovni 20 dBm, čomu zodpovedá 100 mW. [16][18]

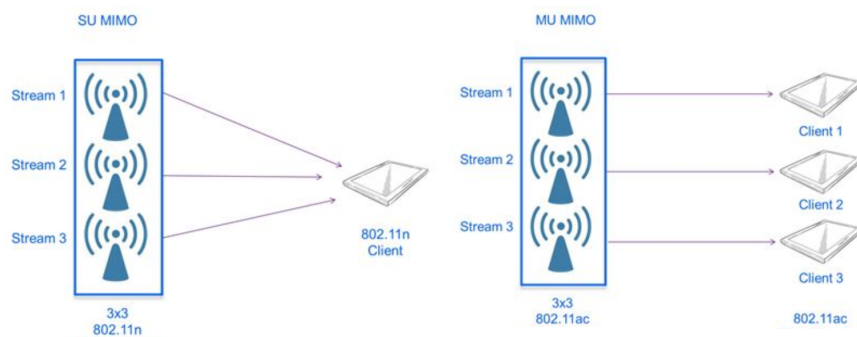
3.4 802.11n

Štandard 802.11n, označovaný aj ako Wi-Fi 4, z roku 2009 je zameraný primárne na výrazne navýšenie prenosovej rýchlosti a prináša podporu technológie MIMO. Pracuje vo frekvenčných pásmach 2.4 GHz a 5 GHz, prináša však možnosť využitia dvojnásobnej šírky kanálu v oboch pásmach. Využitím technológie MIMO a štyroch antén dosahuje štandard prenosovú rýchlosť až 600 Mb/s. Pri šírke kanálu 20 MHz a jedenej anténe dochádza oproti štandardu 802.11g k navýšeniu rýchlosti

na 72 Mb/s. Zároveň pre šírku kanálu 20 MHz sa využíva modulačná technika OFDM o 56 subnosných s kombináciou BPSK, QPSK, 16-QAM a 64-QAM. Pre šírku kanálu 40 MHz je využitá OFDM o 114 subnosných s maximálnou prenosovou rýchlosťou 150 Mb/s.[16][19]

3.5 802.11ac

Ďalší štandard 802.11ac, alebo i Wi-Fi 5, používaný od roku 2013 operuje čisto v pásme 5 GHz s rovnakým kanálovým rozdelením ako u svojich predchodcov. Hlavný rozdiel oproti iným štandardom je šírka pásma. V základe sa využíva šírka 80 MHz, maximálne je však možné využiť až 160 MHz. Ďalšia zmena prichádza i v rozšírení technológie MIMO, kedy je podporovaných až 8 antén. Novinkou je taktiež využitie modulácie 256-QAM, čo v kombinácii s MIMO umožňuje dosiahnuť prenosovú rýchlosť až 6.77 Gb/s. V prípade využitia jednej antény pri plnej šírke pásma sa teoretická rýchlosť pohybuje na hodnote 866.7 Mb/s. Ďalšie novinky, ktoré štandard prináša sú beamforming, MU-MIMO (Multi user Multiple-input and multiple-output) a podpora modulácie až 1024-QAM v závislosti od zariadenia. [16][20]



Obr. 3.2: Princíp MIMO/MU-MIMO

3.6 802.11ad

802.11ad poskytuje štandard pre gigabitové bezdrôtové systémy pracujúce v pásme 60 GHz a je zároveň štandardom pre technológiu WiGig. Využitie vyšších frekvenčných pásiem umožňuje použiť väčšiu šírku pásma a dosiahnuť tak rýchlosti až 7 Gb/s. 802.11ad využíva frekvenčné pásmo 60 GHz, v ktorom je definovaných 6 kanálov (57.24 – 70.20 GHz) o šírke 2.16 GHz. Jednotlivé kanály však nie sú využívané globálne v dôsledku rôznych obmedzení jednotlivých krajín. Pre Európu sú určené kanály 4 (57.24 – 65.88 GHz). I v tomto prípade sa ako modulácia využíva kombinácia OFDM a 64-QAM. [21]

3.7 802.11ax

Štandard 802.11ax, prijatý v Septembri 2020 a známy ako Wi-Fi 6 je priamym nasledovníkom staršieho Wi-Fi 5. Operuje v pásmach 2.4 a 5 GHz, avšak do budúcnosti je pripravený na nové bezlicenčné pásma v rámci pásma 1 – 6 GHz. Tento štandard prináša výrazne navýšenie prenosovej rýchlosti až na teoretických 11 GB/s a výrazné zníženie odozvy. Zmena nastala i v oblasti modulácie, kedy sa využíva kombinácia OFDM, ktorá využíva až 1960 subnosných o šírke 78.125 kHz v kombinácii s moduláciou 1024-QAM. Maximálna šírka kanálu je stanovená na 160 MHz. Do budúcnosti sa plánuje i využitie 6 GHz pásma (5.925 to 7.125 GHz), ktoré by dodatočne prinieslo 14 kanálov o šírke 80 MHz, prípadne 7 o šírke 160 MHz. Samozrejmosťou tohto štandardu je i podpora 8x8 MU-MIMO. [22][23]

3.8 802.11ay

Zatiaľ nevydaný štandard 802.11ay je nasledovníkom už spomenutého 802.11ad. Štandard prináša výrazne navýšenie rýchlosti, ktorá je teoreticky schopná dosiahnuť hodnoty až 176Gb/s. Ako i predchodca, štandard pracuje v pásme 60 GHz, avšak prináša zmenu v možnosti spojenia štyroch kanálov do jedného a využiť tak ich spoločnú šírku, ktorá je až 8.64 GHz. Využitím samotného kanálu sme schopní dosiahnuť maximálnu rýchlosť až 44Gb/s, čo v prípade využitia technológie MIMO umožňuje dosiahnuť spomínaných 176Gb/s. Využívaná modulácia bude pravdepodobne 256-QAM. [24]

3.9 802.11be

Štandard, ktorý je momentálne vo fáze prípravy je štandard 802.11be, označovaný aj ako Wi-Fi 7, ktorý bude nasledovníkom štandardu 802.11ax. Uvedený by mal byť v roku 2024. Z dostupných informácií vieme, že maximálna prenosová rýchlosť sa bude pohybovať na 30 Gb/s a dôjde k výraznému zníženiu odozvy. Frekvenčné pásma by oproti štandardu 802.11ax mali ostať nezmenené, avšak dôjde k rozšíreniu kanálu až na 320 MHz. Novinkou bude možnosť využitia až 16x16 MIMO a 4096-QAM modulácie.[25]

Kapitola 4

Planárne antény

4.1 Základný popis

Prvý krát sa s konceptom planárnych, alebo inak i plošných antén stretávame už v roku 1953. Vývoj i výroba toho typu antén však začala až o 20 rokov neskôr, kedy sa substráty stali dostupnejšie, zdokonalil sa proces leptania a boli zavedené vhodnejšie teoretické modely. Od tohto obdobia uplynula relatívne dlhá doba a postupom času, plošné antény prešli rozsiahlym vývojom. V súčasnosti tieto antény nachádzajú využitie v najrôznejších oblastiach priemyslu, ale i v bežnom živote. Oblúbené sú hlavne vďaka ich malej hmotnosti, relatívne nenákladnej výrobe, alebo možnosti prispôsobenia rôznym povrchom. Môžeme ich nájsť vo vojenskej technike, satelitných systémoch, rôznych koncových zariadeniach, ale i v bežných prístrojoch ako sú mobilné telefóny. Vlastnosti plošných antén úzko súvisia s použitým materiálom, kedy pri výbere kvalitného, avšak výrazne drahšieho, materiálu sme schopní dosiahnuť lepších vlastností. Tie sú taktiež ovplyvnené tvarom antény, ktorý nemení len vizuálny vzhľad, ale i spomínané vlastnosti. Správnym návrhom sme teda schopní doceliť rôzne frekvenčné pásma, na ktoré je anténa naladená, potrebnú polarizáciu, alebo impedanciu. Medzi hlavné výhody tohto typu antén patria nízka hmotnosť, mechanická odolnosť, nízke výrobné náklady, obzvlášť pri masovej produkcii, jednouchá možnosť napájania, možnosť integrácie priamo na plošný spoj zariadenia, prípadne možnosť dosiahnuť viacero polarizácií. Veľkou výhodou planárnych antén je taktiež ich použiteľné frekvenčné pásmo, ktoré sa pohybuje od 100 MHz až do 100 GHz. Avšak i tento typ antény sprevádzajú určité nevýhody a to napríklad relatívne nízky zisk, malá šírka frekvenčného pásma, nižšia efektivita v porovnaní s inými druhmi antén, parazitné vyžarovanie napájacích prvkov, ktoré ovplyvňuje vyžarovacie charakteristiky, alebo nižší maximálny výkon. Ako už bolo spomenuté, plošné antény od svojho vzniku prešli relatívne dlhým vývojom a preto je niekoľko možností, ako spomínané nežiadúce efekty kompenzovať. Pomocou špeciálnych techník sme schopní zväčšiť šírku pásma až o 60 %, nízky zisk môže byť riešený využitím anténnych polí a nízka efektivita zase použitím PBG (Photonic-bandgap) štruktúr. Tieto statické

vlastnosti je za určitých podmienok možné modifikovať, napríklad pri využití diódy s premenlivou kapacitou, závislou na napätí sme schopní ich upravovať, bez potreby výroby novej antény. [26][27]

4.2 Výhody a nevýhody planárnych antén

S konceptom planárnych antén, ako už bolo spomenuté, sa spája rada výhod, či naopak i ich nevýhod. Niektoré výhody, prípadne nevýhody už boli v prechádzajúcej kapitole naznačené. Avšak pre správny návrh a optimalizáciu planárnej antény je potrebné tieto (ne)výhody dobre poznať, preto budú spomenuté samostatne i v tejto podkapitole. Výhody tohto typu antén v porovnaní s konvenčnými anténami teda sú:

- nízka hmotnosť, malé rozmery, nízky profil,
- možnosť prispôsobenia takmer akémukoľvek povrchu,
- nízke výrobné náklady, obzvlášť pri masovej výrobe,
- možnosť dosiahnutia lineárnej a kruhovej polarizácie i pri jednoduchom napájaní,
- jednoduchá výroba duálno-frekvenčných a duálno-polarizovaných antén,
- možnosť včlenenia do mikrovlnných integrovaných obvodov,
- možnosť výroby napájacích prvkov priamo pri výrobe antény. [26][28]

Na druhú stranu sa taktiež stretávame s niekoľkými nevýhodami oproti konvenčným anténam. Tieto nevýhody zahŕňajú najmä:

- malú šírku pásma, typicky okolo 5 %, avšak vďaka moderným postupom sme schopní dosiahnuť šírku pásma až 50 %,
- nízky zisk,
- potrebu zložitých napájacích štruktúr pre vysoko-výkonné polia,
- parazitné vyžarovanie napájacích štruktúr,
- nízky maximálny výkon (typicky 100 W),
- nízku účinnosť,
- vznik povrchových vĺn,
- alebo vysoké Q (quality factor). [26][28]

V súčasnej dobe, vďaka hojným poznatkom planárnych antén, možno veľké množstvo nevýhod kompenzovať rôznymi technikami už pri samotnom návrhu, ale i výberom správneho materiálu.

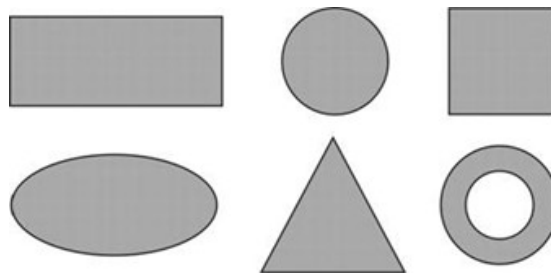
4.3 Typy planárnych antén

Planárne antény sú v porovnaní s ostatnými typmi antén charakterizované väčším množstvom fyzikálnych parametrov. Jednotlivé typy sa od seba odlišujú konštrukciou, výslednými vlastnosťami, šírkou pásma, ziskom, ale i cenou a náročnosťou návrhu. Ako už bolo spomenuté, tieto antény je možné navrhnuť do veľkého množstva rôznych geometrických tvarov. Vo všeobecnosti však tento typ antén rozdeľujeme do 4 základných kategórií, a to na:

- fliačikové antény,
- planárne dipóly,
- tlačené štrbinové antény,
- mikropásikové antény s postupnou vlnou.

4.3.1 Fliačikové antény

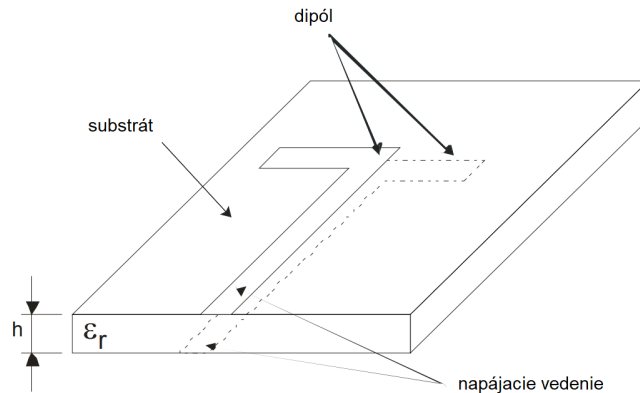
Mikropásikové fliačikové antény pozostávajú z vodivého pásiku rôznych geometrických tvarov, ktorý je umiestnený na jednej strane substrátu, nad zemiakovou plochou, ktorá sa najčastejšie vyskytuje na strane opačnej. Pri týchto anténach sa často stretávame s pravidelnými jednoduchými tvarmi. Prevažne sú využívané pre nenáročné aplikácie. Ich vyžarovacie charakteristiky, aj napriek výrazným rozdielom v tvare, sú často krát podobné, pretože sa správajú ako dipóly. Typická hodnota zisku pre fliačikové antény sa pohybuje na úrovni maximálne 5 dBi, avšak v praxi táto hodnota veľmi závisí od veľkosti antény a použitého substrátu. Čo sa týka vyžarovacej charakteristiky, typická hodnota vyžarovacieho uhlu je medzi 70° a 90° , a jej tvar závisí od konkrétneho návrhu antény a umiestnenia zemiackej roviny. Veľká výhoda týchto antén spočíva i v možnosti použitia flexibilného substrátu, ktorý dovoľuje veľmi dobré prispôbenie akémukoľvek povrchu. Tento typ antén sa často správa úzkopásmovo, čo na jednu stranu v určitých aplikáciách je veľká výhoda, avšak na druhú stranu dosiahnuť širokopásmovosť je relatívne náročné. Najčastejšie sa stretávame s jednoduchým štvorcovým, prípadne obdĺžnikovým tvarom s rozmermi L a W . Tento typ antény je pre svoju jednoduchosť taktiež často využívaný k rôznym metódam analýzy. [26][27][29]



Obr. 4.1: Najčastejšie tvary fliačikových antén[27]

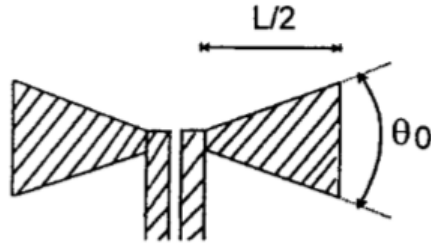
4.3.2 Planárne dipóly

Tieto planárne antény sa oproti vyššie spomínaným pravouhlým fliačikovým anténam líšia hlavne v pomere šírky k dĺžke. Typicky sa stretávame so šírkou dipólu menšou ako $0.05 \lambda_0$ (dĺžka vlny vo voľnom priestore). Vyžarovacia charakteristika dipólu a fliačikovej antény sa pri vhodnom pozdĺžnom rozložení prúdu líši len minimálne. Avšak rozdiely nachádzame v úrovni krížovej polarizácie, šírke frekvenčného pásma i vo vyžarovacom odpore. Tieto antény sú v oblúbe hlavne vďaka ich malým rozmerom a lineárnej polarizácii. Sú obzvlášť vhodné pre vyššie frekvencie a dosahujú výrazne širšie frekvenčné pásma. Príkladom toho typu planárnej antény je symetrický skladaný mikropásový dipól, kombinovaný s jeho zrkadlovým obrazom, vytvárajúc tak symetrickú štruktúru, ktorá sa nachádza na vhodnom substráte. Na opačnej strane substrátu v oblasti koncových ramien, potom často nachádzame reflektor, ktorý slúži na zaistenie smerovosti antény. Vzdialenosť reflektora od samotných ramien je typicky $0.01 < \frac{h \text{ (výška substrátu)}}{\lambda_0} < 0.1$. Šírka pásma takejto antény sa potom pohybuje na hodnote 16 %.[27] [29]



Obr. 4.2: Planárny dipól[30]

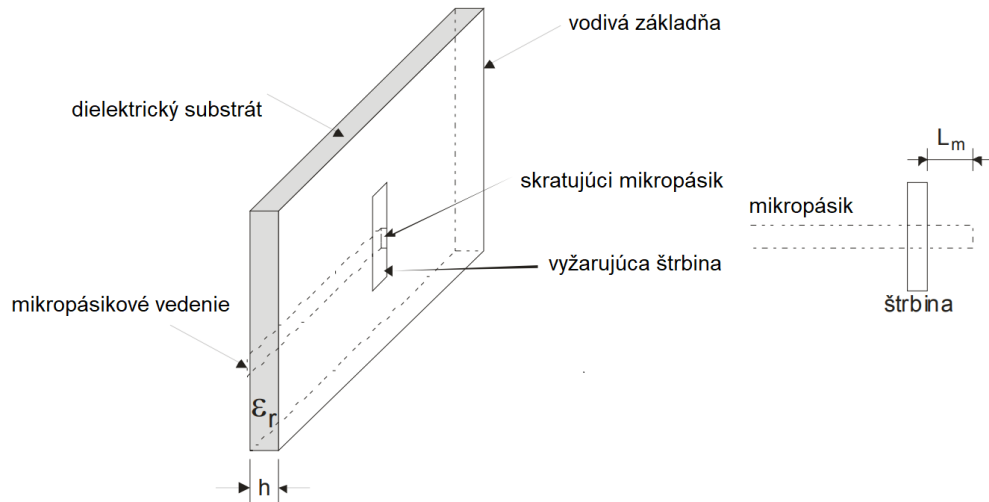
Z vyššie uvedeného teda vyplýva, že za použitia pravouhlých ramien dipólu môžeme očakávať relatívne malú šírku pásma. Tento problém je riešený nahradením koncových ramien dipólov, lichobežníkovým útvarom. Celá štruktúra potom pripomína motýlik, preto vzniká pomenovanie motýlikova anténa. Budeme uvažovať dĺžku dipólu L a uhol θ_0 , ktorý zvierajú ramená spomínaného útvaru. Pre dosiahnutie maximálnej šírky pásma volíme uhol $\theta_0 = 90^\circ$ a výšku útvaru $\frac{L}{2}$. Pri dodržaní zvolených hodnôt sme schopní zvýšiť šírku pásma až na 36 %, čo je výrazná zmena oproti dipólu s nezmenenými ramenami, kedy $\theta_0 = 0^\circ$. Tento typ je vhodný hlavne pre milimetrové vlny. Z obojstrannej zrkadlovej motýlikovej antény vychádzajú i monopolné dipólové anténne polia. Tieto antény teda častokrát nachádzajú využitie v anténnych poliach, hlavne vďaka ich veľkosti. Vyžarovacia charakteristika planárnych dipólov, tak ako i pri iných anténach, je ovplyvnená voľbou vhodného substrátu, ale i zmenou výšky substrátu, alebo hodnoty jeho relatívnej permitivity ϵ_r . [27]



Obr. 4.3: Motýliková anténa[30]

4.3.3 Tlačené štrbinové antény

Štrbinové antény, ako už ich názov napovedá, pozostávajú zo štrbiny v zemiacej rovine substrátu. Táto štrbina môže prakticky nadobúdať ľubovoľné rozmery i tvary. Z teoretického hľadiska, väčšina fliačkových antén môže byť realizovaných práve touto formou, avšak v praxi sa stretávame hlavne so štrbinami v tvare obdĺžnika, kruhu, prstenca a kužela. Výhoda týchto antén pozostáva v ich smerových charakteristikách a šírke frekvenčného pásma. Napájanie je najčastejšie riešené formou mikropásiku, alebo koplanárneho vlnovodu. Na štrbinové antény môžeme všeobecne pozerať ako na obojsmerné žiariče, čo znamená, že vyžarujú po oboch stranách štrbiny. Konkrétny príklad tohto typu môže byť anténa, ktorá vo svojej zemiacej rovine obsahuje štrbinu v tvare obdĺžnika. [27]



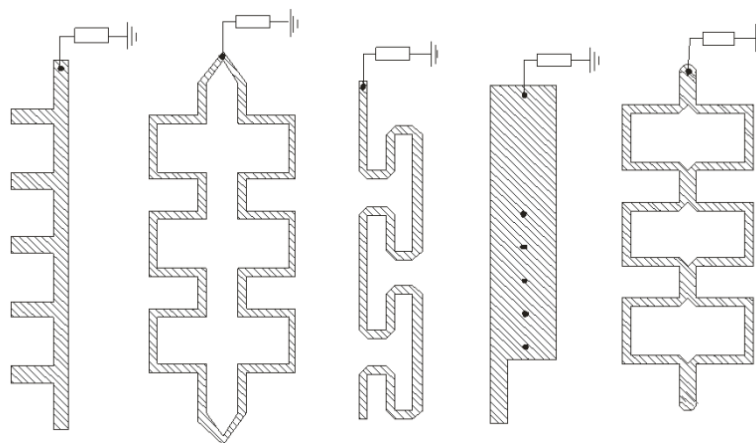
Obr. 4.4: Štrbinová anténa[30]

Na druhej strane substrátu sa potom nachádza mikropásik, ktorý je umiestnený kolmo na štrbinu a je využívaný na jej budenie. Tento pásik je umiestnený tak, aby sa jeho zakončenie nachádzalo vo vzdialenosti L_m od štrbiny. Táto vzdialenosť približne odpovedá štvrtine vlnovej dĺžky. Jedná sa teda o tzv. centrálnu, alebo stredovo napájanú anténu. Avšak takáto konfigurácia, kedy je mik-

ropásik vedený osou kolmo na štrbinu, vykazuje veľmi vysoký vyžarovací odpor. Tento problém je obvykle riešený posunutím mikropásiku tak, aby neviedol osou kolmo na štrbinu, alebo vychýlením štrbiny tak, aby bola porušená jej kolmost na mikropásik. Tieto antény, už zo svojej podstaty sú typické svojou všesmerovou charakteristikou. Preto pre dosiahnutie charakteristiky smerovej, je často anténa doplnená o reflektor.[27]

4.3.4 Mikropásikové antény s postupnou vlnou

Tento typ mikropásikovej antény je tvorený pravidelne sa opakujúcimi útvarmi refazového tvaru, ale i jednoduchými mikropásikmi dostatočnej šírky pre podporu šírenia priečnych vidov. Anténa je častokrát ukončená záťažou, ktorá zabráňuje vzniku stojatých vĺn. Vyžarujúce prvky u tohto typu antén sú vlastne diskontinuity na mikropásikovom vedení. Mikropásikové diskontinuity sú napríklad ohyby vedenia, alebo rôzne spojenia vedení. V prípade rovinného mikropásikového vedenia je elektrické pole na každej strane rovnaké, avšak má opačný smer a nedochádza tak k vyžarovaniu. Pri ohybe, však dochádza k zmene prúdovej hustoty, ktorá je na vnútornej strane ohybu vyššia, ako na strane vonkajšej. Dochádza teda k porušeniu spomínanej rovnováhy a následne tak k vyžarovaniu energie. K obdobnému stavu dochádza i v prípade spojenia dvoch vedení. Pre tieto antény je typická lineárna polarizácia, relatívne jednoduchá a lacná výroba. Šírka pásma sa i v tomto prípade pohybuje na hodnote približne 30 %.[27][30]



Obr. 4.5: Základne tvary antén s postupnou vlnou[30]

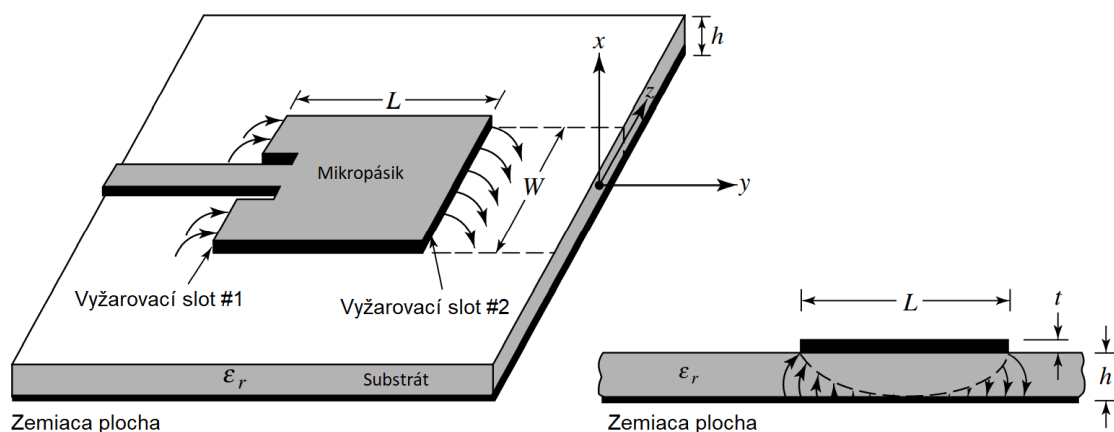
4.4 Konštrukcia planárnych antén

Ako už bolo v prechádzajúcich kapitolách načrtnuté, i napriek rozdielom v jednotlivých typoch planárnych antén je ich konštrukcia založená na podobnom princípe. Anténa pozostáva z veľmi tenkého vodivého pásiku o hrúbke t ($t \ll \lambda_0$), inými slovami, volíme výrazne menšiu hrúbku pásika,

ako je vlnová dĺžka vo voľnom priestore. V praxi sa najčastejšie stretávame s vodivým pásikom v tvare štvorca, obdĺžnika, kruhu, alebo trojuholníku. Tento vodivý pásik je umiestnený vo vzdialenosti $h \ll \lambda_0$ (typicky $0.003 \lambda_0 \leq h \leq 0.05 \lambda_0$) nad zemiakovou rovinou, ktorá je obvykle umiestnená na opačnej strane antény. Zemiaca rovina a vodivý pásik sú oddelené dielektrickým plátom, označovaným ako substrát.

V súčasnej dobe je trhová ponuka substrátov veľmi široká a k dispozícii máme množstvo materiálov s rôznymi vlastnosťami. Výberom vhodného substrátu sme taktiež schopní meniť, už spomínanú hrúbku mikropásika t , kedy hrúbka vodivého povrchu závisí na konkrétnom type substrátu a výrobcovi. Konkrétnym substrátom a ich výberu bude venovaná samostatná kapitola. Výber vhodného substrátu je veľmi dôležitý pre výsledné vlastnosti navrhovanej antény. Typicky volíme substráty, ktorých relatívna permitivita ϵ_r spadá do rozmedzia $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Voľba hrubšieho substrátu s nízkou hodnotou ϵ_r obvykle pre anténu znamená vyššiu účinnosť, zisk, ale i väčšiu šírku pásma, na druhú stranu však i zväčšenie rozmerov samotného vyžarovacieho prvku a samozrejme i zvýšenie nákladov na výrobu. Naopak tenké substráty s vysokou hodnotou ϵ_r sú lacnejšie a vykazujú menšiu účinnosť, vyššie straty, menšiu šírku pásma, avšak umožňujú použitie menších rozmerov vyžarovacích prvkov a zníženie výrobných nákladov. Planárne antény bývajú často integrované do iných obvodov, preto je veľmi dôležité dosiahnuť kompromis medzi veľkosťou antény a jej vlastnosťami.

Všeobecne teda platí, že zmenou hrúbky substrátu sme schopní ovplyvňovať efektivitu antény a šírku frekvenčného pásma, kedy je možné dosiahnuť rozšírenie až o 35 %. Samotné vyžarovacie prvky, ako i napájacie vedenie je zvyčajne vyleptané priamo do samotného substrátu. Ako už bolo spomenuté, vyžarovacie prvky môžu nadobúdať prakticky ľubovoľný tvar. Medzi najatraktívnejšie tvary, hlavne vďaka ich jednoduchosti, patria štvorcové, obdĺžnikové, ale aj kruhové podoby vyžarovacích prvkov.[26]



Obr. 4.6: Konštrukcia planárnej antény[26]

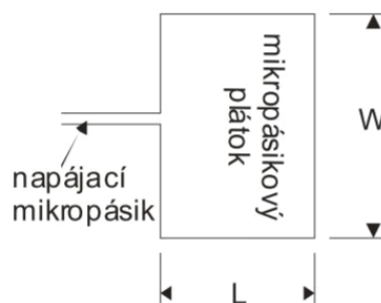
4.5 Napájanie planárnych antén

Anténa, ako zariadenie slúžiace na vysielanie rádiových vln, musí byť určitým spôsobom napájaná. V súčasnosti je k dispozícii mnoho metód napájania, využívajú sa však dva základné princípy a to kontaktné a bezkontaktné napájanie. Ako už názov napovedá, kontaktné napájanie je typ napájania, kedy je zdroj priamo napojený na vyžarovací prvok antény, či už mikropásikom, alebo použitím koaxiálneho kábla. Druhý princíp, a síce bezkontaktné napájanie je typ napájania, kedy je vytvorená väzba elektromagnetickým poľom na prenos energie medzi napájacím mikropásikom a vyžarovacím prvkom antény. Vo všeobecnosti rozlišujeme štyri základné typy napájania:

- napájanie mikropásikovým vedením,
- napájanie koaxiálnou sondou,
- napájanie viazané apertúrou,
- napájanie blízkym poľom.

4.5.1 Napájanie mikropásikovým vedením

Napájanie mikropásikovým vedením je jedna z vôbec prvých používaných metód napájania. Samotné napájanie, ako už názov napovedá, zabezpečuje mikropásik, ktorý je privedený na jeden z okrajov vyžarovacieho prvku antény. Mikropásikové napájanie má oproti iným metódam hneď niekoľko výhod. Jedna z kľúčových výhod je možnosť jednoduchšej výroby, pretože sa nachádza na rovnakom substráte ako samotná anténa. Tento typ napájania je teda vo všeobecnosti veľmi jednoduchý na výrobu, prispôsobenie i na návrh, veľká výhoda je taktiež v možnosti prispôsobenia impedancie presne podľa potreby návrhu. Naopak, veľká nevýhoda spojená s týmto typom napájania je parazitné vyžarovanie samotného napájacieho vedenia a vznik povrchových vln, čo má za následok zužovanie šírky frekvenčného pásma samotnej antény. Tento problém je spojený i s výberom vhodného substrátu. Platia rovnaké podmienky, ako pri konštrukcii antény, a teda so zvyšovaním hrúbky substrátu dochádza k výraznejšiemu parazitnému vyžarovaniu a znižovaniu šírky frekvenčného pásma antény. [27][31]



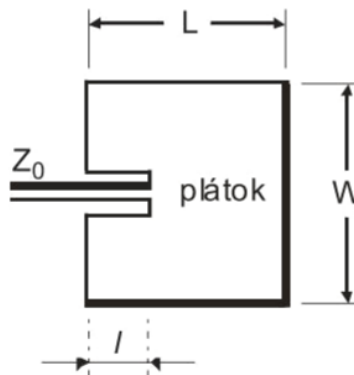
Obr. 4.7: Napájanie mikropásikovým vedením[30]

Pod tento typ napájania spadá taktiež tzv. napájanie mikropásikovým vedením väzbou cez medzeru. V stručnosti sa jedná o typ napájania, kedy je využitý mikropásik, avšak medzi vyžarovacím prvkom a samotným napájaním je úzka medzera, ktorá musí byť dostatočne malá, aby dochádzalo k prenosu energie. Výroba takéhoto napájania je náročná na presnosť a využíva sa z dôvodu jednoduchšieho prispôsobenia vstupnej impedancie.[27][31]



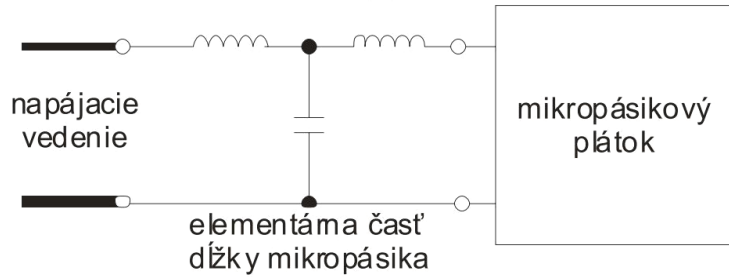
Obr. 4.8: Napájanie mikropásikovým vedením väzbou cez medzeru[30]

Ako jeden z ďalších typov mikropásikového napájania sa využíva i tzv. priame vsunuté mikropásikové napájanie. V stručnosti sa jedná o koplanárny druh napájania. Hlavný dôvod použitia je možnosť prispôsobenia impedancie napájacieho pásiku, bez potreby iných obvodových prvkov, kedy spomínané prispôsobenie je dosiahnuté správnym vsunutím mikropásika do vyžarovacieho prvku. Nepriaznivý dôsledok použitia tohto typu napájania je ovplyvnenie smerovej charakteristiky antény. [27][31]



Obr. 4.9: Priame vsunuté mikropásikové napájanie[30]

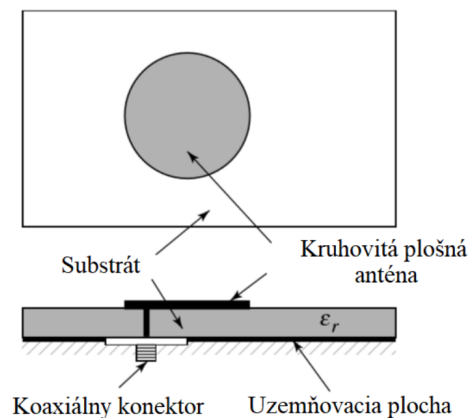
Aproximačný model mikropásikového napájania je zobrazený na nasledujúcom obrázku.



Obr. 4.10: Aproximačný model mikropásikového napájania[30]

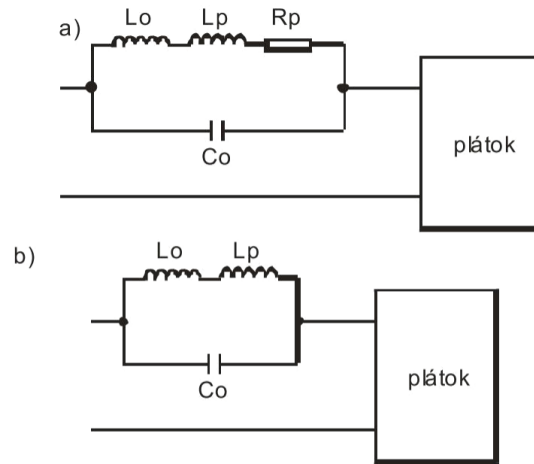
4.5.2 Napájanie koaxiálnou sondou

Medzi ďalší spôsob napájania planárnych antén patrí tzv. napájanie koaxiálnou sondou. Princíp tejto metódy spočíva v pripojení koaxiálneho káblu k anténe takým spôsobom, že vnútorný vodič je pripojený k vyžarovaciemu prvku antény, kým vonkajšie opletenie je spojené so zemiakovou rovinou antény. Samozrejme je možné využiť i vysokofrekvenčný konektor, ktorý bude použitý obdobným spôsobom. Polohu napájania môžeme voľiť ľubovoľne, avšak najsilnejšia väzba nastáva v prípade umiestnenia priamo na okraj vyžarovacieho prvku antény. Poloha samotnej koaxiálnej sondy má taktiež vplyv na impedanciu. Medzi hlavné výhody použitia koaxiálnej sondy radíme malé parazitné vyžarovanie, efektívnosť, ale i jednoduchosť realizácie samotnej metódy. Ako nevýhody treba spomenúť pomerne zložitý návrh pri použití hrubších substrátov ($h > 0.02\lambda_0$), s čím je následne spojené i zúženie frekvenčného pásma antény. V určitých prípadoch realizácie sa stretávame s potrebou vyvrtania diery do samotného substrátu. Fakt, že pre napájanie je využitý koaxiálny kábel taktiež znemožňuje rovinný tvar antény. S problémom sa stretávame i pri použití príliš hrubých substrátov, kedy dochádza k predlžovaniu vnútorného vodiča, čo má za následok zvyšovanie induktívneho charakteru vstupnej impedancie a tak následné problémy s napájaním. Nasledujúce obrázky znázorňujú princíp napájania [27][31]



Obr. 4.11: Princíp napájania koaxiálnou sondou[26]

a jeho aproximačné modely.

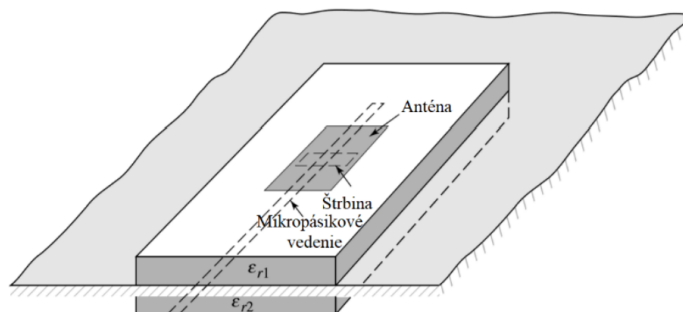


Obr. 4.12: Aproximačný model napájania koaxiálnou sondou[30]

4.5.3 Napájanie viazané apertúrou

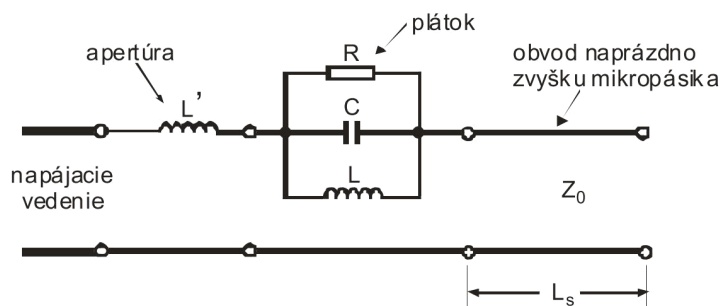
Ako tretí spôsob napájania môže byť využitá tzv. metóda napájania viazaného apertúrou. Pri tejto metóde napájania sa stretávame s dvomi substrátmi, ktoré sú oddelené spoločnou zemiacou rovinou. Na spodnom substráte sa nachádza už spomínané mikropásikové vedenie, ktoré napája samotnú anténu cez štrbinu v spoločnej zemiacej ploche, ktorá substráty oddeľuje. Väzba medzi napájacím mikropásikom a samotnou anténou je tvorená cez spomínanú štrbinu a je sprostredkovaná magnetickým polom. Štrbina môže prakticky nadobúdať ľubovoľný tvar i veľkosť, avšak treba brať ohľad na fakt, že veľkosť väzby je určená práve týmito spomínanými parametrami. Zmenou veľkosti štrbiny a šírky mikropásikového napájania sme taktiež schopní dosiahnuť želané impedančné prispôbenie. Substráty sa väčšinou volia tak, aby spodný substrát, na ktorom sa nachádza mikropásikové vedenie, bol tenší a jeho relatívna permitivita bola vyššia. Horný substrát sa naopak volí hrubší s nižšou relatívnou permitivitou. Veľká výhoda tejto metódy je nízke parazitné vyžarovanie napájacieho prvku, z dôvodu prítomnosti zemiacej roviny, ktorá slúži zároveň ako izolátor a zabraňuje vzájomnej interferencii samotnej antény a mikropásikového napájania. Medzi hlavné nevýhody môžeme zaradiť, výslednú malú šírku frekvenčného pásma antény a zložitosť realizácie, ktorá je z pomedzi všetkých typov najzložitejšia. Použitím tejto metódy taktiež stúpa hrúbka antény a z dôvodu nutnosti použitia dvoch substrátov a samozrejme i cena. [27][31]

Nasledujúce obrázky znázorňujú princíp napájania



Obr. 4.13: Princíp napájania viazaného apertúrou[30]

a jeho aproximačné modely.

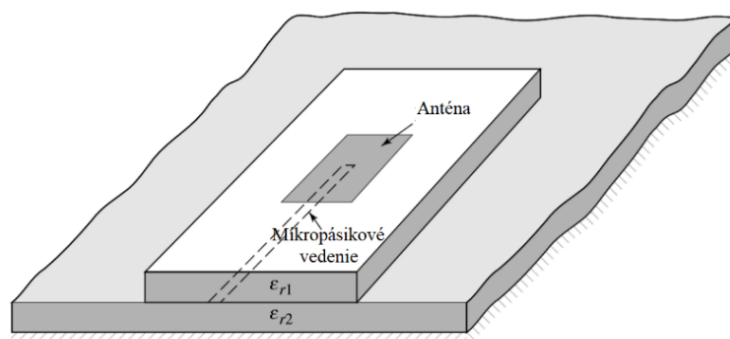


Obr. 4.14: Aproximačný model napájania viazaného apertúrou

4.5.4 Napájanie blízkyim poľom

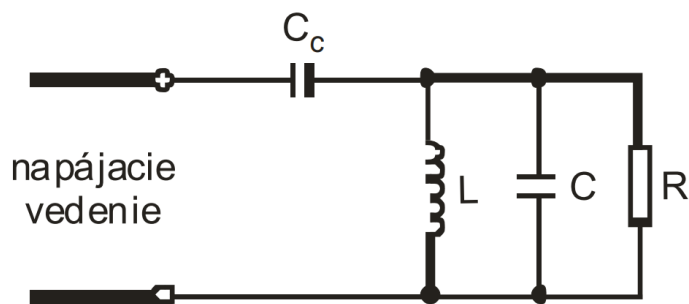
Posledná metóda a síce budenie blízkyim poľom taktiež využíva 2 substráty, medzi ktorými je však umiestnený napájací mikropásik. Obdobne ako pri predchádzajúcej metóde, samotný vyžarovací prvok je umiestnený na vrchnom substráte. Vhodnou kombináciou týchto substrátov sme schopní rozšíriť frekvenčné pásmo antény a potlačiť parazitné vyžarovanie napájacieho mikropásiku. Substráty sa taktiež volia podľa dĺžky napájacieho mikropásiku a zároveň aj pomeru šírky samotnej antény ku vzdialenosti od napájacieho mikropásiku. Za hlavnú nevýhodu možno považovať náročnosť výroby, primárne kvôli potrebe precízneho umiestnenia oboch substrátov. [27][31]

Nasledujúce obrázky znázorňujú princíp napájania



Obr. 4.15: Princíp napájania blízky poľom[30]

a jeho aproximačné modely.



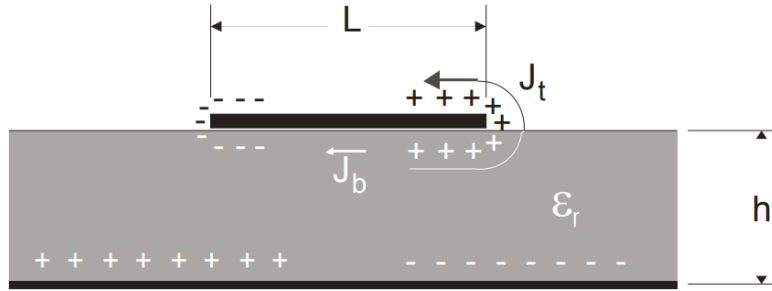
Obr. 4.16: Aproximačný model napájania blízky poľom[30]

4.6 Vyžarovanie planárnych antén

V predchádzajúcich kapitolách už bolo spomenuté, že vyžarovanie, či už mikropásikového vedenia, ale i samotnej antény, je ovplyvnené výberom vhodného substrátu. Tenké materiály s vysokou hodnotou relatívnej permitivity vyžarovanie výrazne redukujú, naopak hrubé materiály s nízkou hodnotou zabezpečujú vyššiu účinnosť vyžarovania a preto sú pri návrhu často preferované. Vyžarovanie planárnej antény môžeme určiť z rozloženia elektromagnetického poľa medzi samotným vyžarovacím prvkom antény a vodivou zemiakov plochou, alternatívne i z rozloženia povrchových prúdov na vyžarovacom prvku antény. Presný výpočet rozloženia elektromagnetického poľa i prúdového rozloženia je veľmi náročný, preto je možné a i priam žiaduce využiť rôzne aproximácie.

Pre zjednodušenie budeme uvažovať planárnu anténu pravouhlého tvaru, ktorá je pripojená na zdroj. V dôsledku budenia antény dochádza k rozloženiu náboja na oboch stranách mikropásika

i na povrchu vodivej zemiacej plochy. Toto nábojové rozloženie je znázornené na obrázku číslo 4.17.[27]



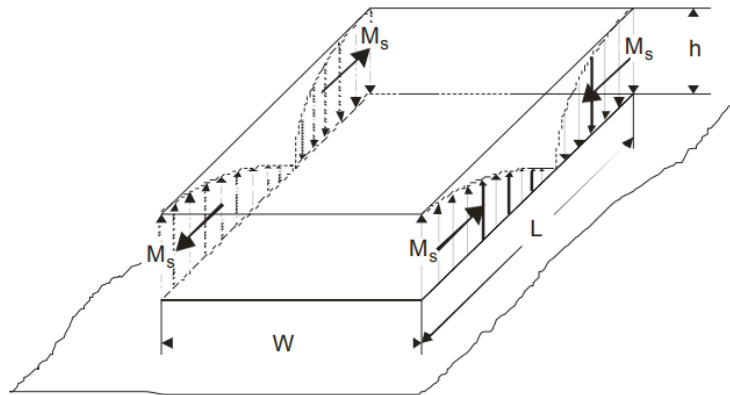
Obr. 4.17: Nábojové rozloženie a prúdová hustota na mikropásiku[30]

Ako je z obrázku možno pozorovať, na mikropásiku sa objavuje kladný i záporný charakter nábojového rozloženia. Toto je spôsobené samotnou dĺžkou mikropásiku, ktorý je rovný približne polovici vlnovej dĺžky. Odpudivé sily medzi rovnakými nábojmi na spomínanej spodnej časti mikropásika majú tendenciu „vytlačiť“ časť náboja okolo jeho hrán až na samotný horný povrch prvku. Tento pohyb vytvára príslušné prúdové hustoty \vec{J}_b a \vec{J}_t , na dolnom a hornom povrchu mikropásika tak, ako to je znázornené na obrázku. Pre väčšinu planárnych antén platí, že pomer hrúbky substrátu a šírky vyžarovacieho prvku je veľmi malý, preto prevláda príťažlivá sila medzi nábojmi a i napriek spomínanému javu, väčšina náboja ostáva koncentrovaná pod mikropásikom. Malé množstvo prúdu však tečie i okolo hrán prvku, a vytvára tak slabé magnetické pole, tangenciálne k hranám prvku. Pre zjednodušenie budeme považovať toto pole za nulové. Okolo obvodu mikropásika teda umiestňujeme tzv. magnetické steny. Táto aproximácia je vhodnejšia i presnejšia v prípade využitia tenkých substrátov s vysokou hodnotou relatívnej permitivity. Pri použití substrátu, ktorého výška je výrazne nižšia ako vlnová dĺžka ($h \ll \lambda$) v dielektriku, môžeme považovať premenlivosť poľa pozdĺž výšky substrátu za konštantnú a elektrické pole za takmer kolmé na povrch mikropásika. V dôsledku tohto môžeme mikropásik modelovať ako dutinu s elektrickými stenami na vrchnej i spodnej strane mikropásika (z dôvodu skoro kolmosti elektrického poľa na povrch mikropásiku) a štyrmi magnetickými stenami okolo obvodu mikropásika (magnetické pole, tangenciálne k hranám prvku považujeme za nulové). V takejto konfigurácii je možné vybudiť len TM (transverzálne magnetické) vidy.

Spomínané štyri bočné steny reprezentujú štyri úzke štrbiny, ktoré zabezpečujú samotné vyžarovanie. Uplatnením Huygensovho princípu môžeme reprezentovať mikropásik prúdovou hustotou \vec{J}_t z jeho horného povrchu. Bočné štrbiny môžeme zase reprezentovať prúdovými hustotami \vec{J}_s a \vec{M}_s , ktoré zodpovedajú magnetickému \vec{H}_a a elektrickému \vec{E}_a poľu v jednotlivých štrbinách.

Pre tenké substráty platí, že prúdová hustota na vrchu mikropásika \vec{J}_t je výrazne menšia ako prúdová hustota \vec{J}_b na strane spodnej, preto prúdovú hustotu \vec{J}_t uvažujeme nulovú. Obdobne na tom sú i tangenciálne magnetické polia okolo obvodu mikropásika a ich príslušné prúdové hustoty

\vec{J}_s , ktoré uvažujeme ako nulové. Z vyššie spomenutého teda vyplýva, že jediná nenulová je prúdová hustota \vec{M}_s pozdĺž obvodu mikropásika. Prítomnosť zemiacej roviny, ktorá je zohľadnená teóriou obrazu (teória opisujúca tzv. virtuálne zdroje umiestnené pod zemiadou rovinou a zohľadňujúca teda odrazy od tejto roviny), zdvojnásobuje príslušnú prúdovú hustotu \vec{M}_s . Vyžarovanie mikropásiku teda môže byť pripísané spomínaným štrbinám pozdĺž obvodu mikropásika. Avšak štrbiny dĺžky L a výšky h k samotnému vyžarovaniu neprispievajú z dôvodu fázového posunu ekvivalentných prúdových hustôt o 180° a ich približne rovnakej veľkosti. Tento potláčajúci efekt je znázornený na obrázku číslo 4.18.[27]



Obr. 4.18: Rozloženie prúdovej hustoty na nevyžarujúcich štrbinách[27]

Zostávajúce dve štrbiny dĺžky W a výšky h vytvárajú dvojprvkové pole s príslušnými prúdovými hustotami rovnakej veľkosti a rovnakej fázy, vzdialené o dĺžku L . Prúdové hustoty teda budú sčítané a vyžarovanie antény nastáva v smere kolmom na štrbiny. Vo vzdialenom bode teda dochádza k tzv. konštruktívnej interferencii. Celkové vyžarovanie teda môžeme popísať prostredníctvom vyžarujúcich a nevyžarujúcich štrbín, na základe ktorých môžeme určiť ďalšie vlastnosti, ako smerová charakteristika, vstupná impedancia a iné. [27]

4.7 Viacpásmové planárne antény

V súčasnosti sa do popredia dostáva čoraz viac bezdrôtových technológií, ktoré sa stávajú obľúbené, či už v priemyselnom, alebo domácom využití. Častokrát sa stretávame so stavom, kedy konkrétna technológia neoperuje len v jednom frekvenčnom pásme, ale využíva ich hneď niekoľko. Jednotlivé pásma od seba môžu byť vzdialené i jednotky GHz. Využitie „klasických“ antén, ktoré sú prispôbené len pre jedno určité frekvenčné pásmo by teda bolo veľmi nepraktické, či už z cenového, výrobného ale i užívateľského hľadiska. Do popredia sa teda čoraz viac dostávajú takzvané viacpásmové antény. Ako už názov napovedá, jedná sa o anténu, ktorá je prispôbená pre viacero

frekvenčných pásiem. Častokrát sa stretávame s pojмами ako dvoj, či troj pásmová anténa, kde názov napovedá, na koľkých frekvenčných pásmach je anténa schopná operovať. Ich veľká výhoda spočíva v možnosti náhrady viacerých antén jednou konkrétnou, ktorá je prispôbená pre viacero pásiem. Ďalšia výhoda pozostáva zo zníženia výrobného objemu a samozrejme i z celkovej nižšej ceny. Na druhú stranu návrh takejto antény je zložitejší.

Vo všeobecnosti je známych niekoľko techník, ako dosiahnuť viacpásmovosti antén. Využitie týchto postupov nám uľahčuje návrh, avšak k návrhu každej antény treba pristupovať individuálne.

4.7.1 Napájanie blízkym polom

Prvým spôsobom, ako je možné zabezpečiť viacpásmovosť antény je využitie napájania blízkym polom. Ako už bolo spomenuté pri variantoch napájania, pre využitie toho spôsobu sú potrebné dva substráty. Majme teda vyžarovací element obdĺžnikového tvaru so skosenými rohmi a stredovou obdĺžnikovou štrbinou, ktorý sa nachádza na vrchnom substráte. Ďalej majme napájacie vedenie meandrovitého tvaru, ktoré je umiestnené na vrchnej strane spodného substrátu, ktorým je napájaný samotný vyžarovací element. Napájacie vedenie je typicky napojené i na konektor. Zemiaca plocha, ktorá je tvorená štrbinami je potom umiestnená na spodnej strane spodného substrátu. Kombinácia štrbín v zemiacej ploche, vedenia a samotného mikropásika má za následok viacpásmovosť takejto štruktúry.[28][32]

4.7.2 Štrbiny

Ďalší spôsob pozostáva z využitia takzvaných slotov, alebo štrbín. Pre tento spôsob je typické, že dochádza k narušeniu monotónneho tvaru vyžarovacieho elementu rôznymi štrbinami, čo má za následok viacpásmovosť antény. Štrbiny je možné umiestniť priamo na vyžarovací element, ktorý z pravidla má obdĺžnikový tvar, ale i na zemiacu plochu. Najčastejšie sa stretávame so štrbinami v tvare „U“, „J“, prípadne v tvare obdĺžniku o rôznych veľkostiach.[32][33][34]

4.7.3 Parazitné rezonátory

Tretí spôsob a síce využitie parazitných rezonátorov, ako už názov napovedá, pozostáva z využitia parazitných štruktúr, ktoré následne zabezpečia viacpásmovosť antény. Parazitné rezonátory sa dajú využiť jednak pre zvýšenie šírky pásma antény v prípade, kedy rezonujú v blízkosti rezonančnej frekvencie mikropásika, zabezpečujú však i viacpásmovosť v prípade, kedy sú navrhnuté tak, aby rezonovali na požadovaných frekvenciách. Rezonátory môžu byť napájané priamo pomocou tenkého mikropásika, ktorým je rezonátor pripojený priamo na hlavný vyžarovací element antény, alebo pomocou kapacitnej väzby, kedy nedochádza k priamemu spojeniu a rezonátor je napájaný elektrickým polom.[32]

4.7.4 Kombinácia rôznych fliačikov

Medzi ďalší spôsob môžeme zaradiť využitie viacerých vyžarovacích elementov. Jedná sa o metódu, kedy viacpásmovosť antény je zabezpečená viacerými vyžarovacími elementami, ktoré sú napájané spoločným vedením a sú osadené nad spoločnou zemiou rovinnou. Jednotlivé vyžarovacie elementy rezonujú na konkrétnych, avšak rôznych frekvenciách, čo dokopy vytvára jednotnú štruktúru rezonujúcu na viacerých frekvenciách.[35]

4.7.5 Viacvrstvé štruktúry

Pre dosiahnutie viacpásmovosti je možné využiť metódu vrstvenia mikropásikov. Táto metóda pozostáva z navrstvenia substrátov, na ktorých sa nachádzajú jednotlivé mikropásikové antény. Horná časť typicky rezonuje na vyšších frekvenciách. Spodná časť býva z pravidla rozmerovo väčšia, rezonuje na nižších frekvenciách a zároveň slúži ako zemiaci rovin pre horný mikropásik a zároveň je horným pásikom ovplyvňovaná minimálne. Rovina na dolnej strane spodného substrátu potom slúži ako zemiaci rovin pre spodný mikropásik. Napájanie je riešené koaxiálnou sondou, ktorá sa pripája k hornému mikropásiku. Veľkostným pomerom jednotlivých pásikov sme taktiež schopní ovplyvňovať polarizáciu. [28][36]

Kapitola 5

Dielektrické substráty

5.1 Vlastnosti dielektrických substrátov

V predchádzajúcich kapitolách sa niekoľkokrát stretávame s pojmom dielektrický substrát. Ako už bolo spomenuté, jedná sa o dielektrický materiál, ktorý sa obvykle nachádza medzi zemiacou rovinou a vyžarovacími prvkami antény. Dielektrický materiál, alebo i dielektrikum, je izolant so schopnosťou polarizácie. Inými slovami, pri vložení dielektrika do elektrického poľa dochádza k javu nazývaný polarizácia. Pri tomto jave sa z atómov dielektrika stávajú elektrické dipóly, dochádza teda k nerovnomernému rozloženiu častíc s nábojom vo vnútri samotných atómov. Tieto dipóly majú pri polarizácii opačnú polaritu k polarite vonkajšieho elektrického poľa, ktoré na ne pôsobí. V dôsledku tohto dochádza k znižovaniu veľkosti spomínaného vonkajšieho elektrického poľa. S týmto javom súvisí i prvý veľmi dôležitý parameter, ktorý je potrebné pri návrhu planárnych antén a výbere vhodného substrátu zohľadňovať, a sice relatívna permitivita dielektrika. Relatívnou permitivitou určujeme ako pomer intenzity vonkajšieho elektrického poľa E_0 k intenzite výsledného elektrického poľa E .

$$\epsilon_r = \frac{E_0}{E} \quad (5.1)$$

Pri pôsobení premenlivého elektrického poľa na dielektrikum dochádza i k čiastočnej premene energie na teplo. Pre jednoduchosť si môžeme predstaviť ideálny kondenzátor bez strát, kde prúd predbieha napätie o $\varphi = 90^\circ$. V prípade reálneho kondenzátoru je však posun prúdu menší a časť energie je premenená na teplo. Táto energia potom odpovedá tangensu uhlu práve tohto posunu. Stratovosť dielektrika možno i vyjadriť ako:

$$\tan \delta = \frac{\omega \epsilon'' + \sigma}{\omega \epsilon'} \quad (5.2)$$

kde ω je uhlová frekvencia, ϵ'' je imaginárna časť permitivity materiálu, ϵ' je reálna časť permitivity materiálu.[37][38][39]

5.2 Vplyv vlastností substrátu na planárnu anténu

Spomenuté vlastnosti, teda relatívna permitivita i dielektrické straty spolu s výškou substrátu, sú veľmi dôležité parametre, na ktoré je potrebné brať ohľad. Ako už bolo spomenuté, voľbou vhodného substrátu s vhodnými vlastnosťami sme schopní veľmi priaznivo, ale i nepriaznivo ovplyvniť výsledné vlastnosti navrhovanej antény.

Jedným z parametrov, ktorý sme schopní ovplyvniť priamo výberom substrátu je šírka pásma danej antény, ktorá je závislá od relatívnej permitivity a výšky substrátu. Všeobecne platí, že tento parameter je priamo úmerne závislý na výške substrátu. Na druhú stranu zvyšovanie hodnoty relatívnej permitivity má za následok zužovanie šírky pásma. Obdobne je na tom i účinnosť antény, ktorá klesá so zvyšujúcou sa relatívnou permitivitou, naopak s nižšou relatívnou permitivitou zase rastie. Nemenej dôležitý parameter, a síce zisk antény je taktiež možné ovplyvniť samotným substrátom, kedy platí, že jeho hodnota rastie s klesajúcou hodnotou relatívnej permitivity.

Čo sa týka stratovosti dielektrika, i tento parameter ovplyvňuje celkové vlastnosti antény. Vyššou hodnotou stratovosti sme schopní dosiahnuť vyššiu šírku pásma, avšak na úkor efektivity a zisku, ktoré výrazne klesajú. Od výberu vhodného substrátu sa odráža i výsledná veľkosť, resp. hmotnosť antény, nakoľko hrubšie substráty s nízkou hodnotou relatívnej permitivity majú za následok zväčšovanie vyžarovacích elementov antény. Výber vhodného substrátu je teda založený na akomsi kompromise medzi šírkou pásma, efektivitou a ziskom antény.[26]

5.3 Výber vhodného dielektrického substrátu

Momentálna trhová ponuka, čo sa týka dielektrických substrátov je pomerne široká. K dispozícií sú rôzne materiály s rôznymi vlastnosťami a rozmermi, vďaka čomu je možné voľiť substrát presne podľa našich nárokov. Pri výbere vhodného substrátu sa stáva hlavným limitujúcim faktorom cena, na ktorej závisia i vlastnosti daného substrátu. V nasledujúcich riadkoch bude zhrnutých niekoľko substrátov, ktoré je možné na trhu dostať. Pri výbere vhodného substrátu som sa primárne zameral na elektrické vlastnosti a cenu, mechanické vlastnosti v tomto prípade nehrali veľkú rolu.

FR-4

Pravdepodobne najznámejší a zároveň najpoužívanější i cenovo najdostupnejší substrát nesie označenie FR-4. Jedná sa o sklom vystužený epoxidový laminátový materiál, ktorý môžeme nájsť vo väčšine plošných spojov. Ide o cenovo veľmi dostupný a obľúbený substrát, ktorý je tepelne odolný do teploty 130°C. Elektrické i mechanické vlastnosti FR-4 však závisia od konkrétneho výrobcu, jednotlivé substráty sa teda mierne svojimi vlastnosťami líšia, typicky sa však hodnota relatívnej permitivity pohybuje na hodnote 4.2 – 4.8, stratovosť okolo hodnoty 0.02 a výška substrátu 1.5 – 1.6 mm.[40]

Dupont Pyralux AP 9111R

Substrát s označením Dupont Pyralux AP 9111R je zaujímavý hlavne vďaka svojim flexibilným vlastnostiam. Je tvorený polymérom s názvom polyimid a je vhodný pre flexibilné plošné spoje. Za zmienku stojí i vysoká tepelná odolnosť, ktorá dosahuje až 180°C. Oproti substrátu FR-4 dosahuje relatívna permitivita nižšej hodnoty, a síce 3.4, stratovosť je výrazne nižšia s hodnotou 0.003. Vďaka svojim mechanickým vlastnostiam je substrát obzvlášť vhodný pre aplikácie, ktoré vyžadujú inštaláciu napríklad antén, na nerovné povrchy.[41]

Rogers RO4003C

Vystužený sklo-keramický laminát s označením Rogers RO4003C je využívaný ako výrazne nákladnejšia, ale i vlastnosťami kvalitnejšia alternatíva substrátu FR-4. Je vhodný pre aplikácie, ktoré vyžadujú lepšie elektrické, ale i mechanické vlastnosti substrátu na úkor vyššej ceny. Substrát je dostupný vo viacerých hrúbkových variantoch. Čo sa týka elektrických vlastností, relatívna permitivita dosahuje hodnotu 3.55, stratovosť 0.0027. Výhoda substrátu Rogers RO4003 spočíva taktiež v zachovaní svojich vlastností i pri vysokých frekvenciách. Za zmienku stojí i jeho vysoká tepelná odolnosť, ktorá umožňuje substrát spoľahlivo využiť do teploty až 280°C.[42]

Astra MT77

Jeden z ďalších laminátových materiálov nesie označenie Astra MT77. Substrát Astra MT77 vykazuje veľmi dobré elektrické vlastnosti v kombinácii so širokým teplotným i frekvenčným rozsahom. Vďaka svojim vlastnostiam je využívaný na veľké množstvo komerčných aplikácií. Príkladom využitia sú radary pre automobilový priemysel. Relatívna permitivita substrátu dosahuje hodnoty 3.0, stratovosť 0.0017. Substrát ponúka tepelnú rezistenciu až do 200°C.[43]

RT/duroid 5880

Posledný spomenutý substrát, a síce RT/duroid 5880 patrí medzi špičku na trhu. Jedná sa o PTFE substrát vystužený sklenenými mikrovláknami, ktoré zabezpečujú rovnomernosť relatívnej permitivity. Precíznosť substrátu a výroby má za následok konštantné vlastnosti nezávisle na kuse, či frekvencii. RT/duroid 5880 je veľmi odolný voči všetkým rozpúšťadlám a činidlám, preto je vhodný i pre veľmi náročné aplikácie. Popredné miesto na trhu potvrdzujú i jeho elektrické vlastnosti, kedy relatívna permitivita dosahuje hodnoty 2.2, stratovosť 0.0004. Vzhľadom na výborné elektrické i mechanické vlastnosti patrí substrát do kategórie cenovo náročných. Substrát spoľahlivo odoláva teplotám až do 260°C. [44]

Z vyššie spomenutých substrátov je zrejme, že momentálna ponuka je veľmi široká a nie je teda problém nájsť substrát presne podľa našej požiadavky. Z riadkov vyššie vyplýva, že vlastnosti substrátu sú úzko späté z jeho cenou. Momentálne najvyužívanejší substrát v bežných, nie príliš náročných aplikáciach nesie označenie FR4. Tento substrát možno nájsť v drvivej väčšine komerčne dostupných plošných antén. Naopak špička na trhu, ktorá je využívaná primárne pre najnáročnejšie aplikácie, na ktoré sú kladené tie najvyššie požiadavky nesie označenie RT/duroid 5880. Tento substrát vyniká svojimi výbornými vlastnosťami, ktoré sa prejavujú vo vysokej cene. Tento typ substrátu je samozrejme možné využiť i pre bežné aplikácie, avšak jeho použitie je v takomto prípade veľmi neekonomické, ba priam až zbytočné.

Keďže navrhovaná anténa je určená pre technológiu 802.11, bude teda pracovať primárne v pásme 2.4 a 5 GHz. Vo všeobecnosti je známe, že substrát FR-4 dosahuje vo frekvenciách nad 1 GHz vyššiu stratovosť a antény tak následne nižší zisk. Avšak z komerčnej sféry, kde množstvo antén je navrhnutých práve na tento typ substrátu, alebo rôznych pozorovaní sa ukazuje, že substrát FR-4 je možné relatívne dobre využiť i vo vyšších frekvenciách. Vzhľadom na tieto pozorovania a cenovú, i celkovú dostupnosť som zvolil substrát FR-4 s nasledujúcimi vlastnosťami:

- výška substrátu - 1.5 mm,
- hrúbka medenej vrstvy - 35 μm ,
- relatívna permitivita - 4.55,
- stratovosť dielektrika - 0.0175.[40]

Kapitola 6

Návrh, simulácia a optimalizácia antény

6.1 CST Studio

Počítačový simulačný program CST Studio je nástroj slúžiaci na simuláciu, návrh a analýzu vysokofrekvenčných, elektromagnetických i optických štruktúr. CST Studio je v súčasnosti dostupné v dvoch formách a to plnohodnotnej verzii a verzii pre študentov. Študentská verzia ponúka značne obmedzené možnosti simulácií a nízku presnosť, na druhú stranu táto verzia je dostupná zadarmo. Plnohodnotná verzia tieto obmedzenia pochopiteľne odstraňuje a je tak možné ľubovoľne vytvárať 3D modely rôznych antén, filtrov, optických štruktúr a konektorov vo veľmi vysokej presnosti. Modely je následne možno analyzovať v časovej, alebo frekvenčnej oblasti. Samotný proces analýzy je založený na diskretizovaní celej štruktúry do podoby jednotlivých buniek tzv. „mesh cells“, ktorých počet i veľkosť sa líši v závislosti na požadovanej presnosti. Samotné numerické výpočty modelu sú založené na Maxwellových rovniciach a zabezpečujú ich tzv. solvery. CST Studio ponúka na výber z viacerých solverov, ktoré sa líšia jednak princípom, ale i vhodnosťou pre jednotlivé modely. Za zmienku stoja dva najzákladnejšie a zároveň najpoužívanejšie:

- Time Domain Solver,
- Frequency Domain Solver.[45]

Time Domain Solver – typ solveru, ktorý slúži na analýzu štruktúr v časovej oblasti. TDS funguje na základe metódy FIT (Finite Integration Technique). Táto metóda je podobná metóde konečných diferencií, avšak namiesto Maxwellových rovníc v diferenciálnom tvare sa používa tvar integrálny. Kombinácia hardvérovej akcelerácie a MPI klastrového výpočtu umožňuje túto metódu využiť i na širokopásmové simulácie extrémne veľkých a detailných modelov.[45]

Frequency Domain Solver – typ solveru, slúžiaci na analýzu štruktúr v oblasti frekvenčnej. FDS funguje na základe metódy FEM (Finite Element Method). Princíp metódy spočíva v diskretizácii spojitého kontinua do určitého počtu prvkov. Zisťované parametre sú následne určované len v jednotlivých uzlových bodoch. Tento typ solveru je obzvlášť vhodný pre viacportové štruktúry, úzkopásmové štruktúry, ale i filtre a rôzne polia.[45]

6.2 Návrh antény

6.2.1 Definovanie vlastností a odvodenie parametrov antény

Ako úplne prvý krok návrhu bolo potrebné určiť parametre budúcej antény. Keďže anténa je primárne určená pre štandard 802.11 musí byť schopná operovať v rámci frekvenčného pásma tejto technológie. Ako už bolo v prechádzajúcej kapitole popísané, štandard 802.11 zahŕňa pomerne veľké množstvo jednotlivých štandardov, ktoré operujú v rôznych frekvenčných pásmach. Štandardy, ktoré sú najrozšírenejšie a zároveň v súčasnosti najpoužívanjšie fungujú v ISM pásmach 2.4 a 5 GHz. Anténa bude teda primárne navrhovaná pre tieto dve frekvenčné pásma, z čoho vyplýva potreba viacpásmovosti navrhovanej antény.

Spomenuté frekvenčné pásma, v ktorých operujú dané štandardy sa líšia nielen frekvenciou, ale i celkovou šírkou. Pásmo 2.4 GHz je výrazne užšie a jeho šírka je necelých 100 MHz. Keďže 1. a 14. kanál v rámci tohto pásma je ohraničený frekvenciami 2401 a 2495 MHz je potrebné aby v tomto pásme anténa dosahovala hodnoty parametru S_{11} maximálne -10 dB, čomu odpovedá hodnota PSV (pomer stojatých vln) približne 2.0: 1. V ideálnom stave by PSV v celom pásme malo zodpovedať hodnote 1.0: 1, čo by malo za následok, že všetka energia dodaná do antény by bola využitá a nedochádzalo by k odrazom od impedančného neprispôsobenia. Dosiahnuť tento stav je však v reálnom svete nemožný. Z praxe je známe, že anténa pre bezproblémové fungovanie v rámci pásma, pre ktoré je určená by nemala svojou hodnotou PSV prekračovať 2.0: 1. Pri vyšších hodnotách dochádza k odrazu významnej časti energie od impedančného neprispôsobenia, čo má za následok nefunkčnosť antény a môže v určitých prípadoch viesť i k poškodeniu samotného zdroja. Čo sa týka pásma 5 GHz, šírka celého pásma zodpovedá hodnote skoro 1 GHz. Používané kanály sú v tomto prípade ohraničené frekvenciami 5150 a 5875 MHz. Na parametre S_{11} a PSV platí i v rámci toho pásma rovnaká požiadavka ako pri pásme 2.4 GHz, a síce S_{11} maximálne -10 dB, čomu odpovedá hodnota PSV približne 2.0: 1. Keďže sa bude jednať o plošnú anténu relatívne malých rozmerov, nemožno očakávať vysokú hodnotu zisku. Avšak pre možnosť plnohodnotného využitia antény by sa hodnota zisku mala pohybovať okolo 0 dBi. Požiadavky na navrhnutú anténu možno pre prehľadnosť sledovať v nasledujúcej tabuľke č. 6.1.

Tabuľka 6.1: Minimálne požiadavky na navrhovanú anténu

Pásmo [MHz]	S_{11} [dB]	PSV [-]	$Zisk$ [dBi]	$Efektivita$ [%]	Šírka pásma[MHz]
2400	< -10	$< 2.0 : 1$	0	51	95
5000	< -10	$< 2.0 : 1$	0	51	725

Ako už bolo v predchádzajúcej kapitole povedané, navrhovaná plošná anténa bude posadená na dielektrický substrát typu FR-4 s hodnotou relatívnej permitivity 4.55 a výškou 1.5 mm. Tento substrát bol zvolený vzhľadom na jeho veľkú dostupnosť a výrazne nízku cenu. Bližšie informácie ohľadom výberu je možné sledovať v predchádzajúcej kapitole.

Ako ďalší krok bolo potrebné zvoliť vhodný spôsob napájania antény. Ako už bolo spomenuté využívajú sa štyri najobľúbenejšie varianty a to napájanie mikropásikovým vedením, napájanie koaxiálnou sondou, napájanie viazané apertúrou a budenie blízkym polom. Keďže v návrhu budúcej antény uvažujeme zemiace plochy na spodnej strane substrátu a vyžarovacie elementy na strane hornej, bol zvolený druhý spôsob a síce napájanie koaxiálnou sondou. Tento typ napájania bol zvolený i vzhľadom na technológiu, v ktorej bude operovať a rade ďalších výhod ako napríklad následná jednoduchosť pripojenia antény na anténny analyzátor, možnosť použitia viacerých druhov konektorov, prípadne možnosť jednoduchšej úpravy napájacieho koaxiálneho kábla v prípade poruchy, alebo poškodenia, či už samotného kábla, alebo konektoru. Tento typ napájania bude realizovaný prostredníctvom jedného z najbežnejších koaxiálnych VF (vysoko frekvenčných) konektorov, a síce konektorom typu SMA. Volebný bol PCB (Printed circuit board) konektor SMA typu samica tzv. SMA(f) so štyrmi nožičkami, ktoré sú prispôbosené pre použitie na substrátoch o výške 1.5 mm. Samotná inštalácia konektoru bude realizovaná tak, že stredový vodič konektoru bude prispájkovaný na vyžarovací element antény, spodné nožičky zase k zemiacej ploche antény, ktorá sa nachádza na spodnej strane substrátu.

Čo sa týka materiálov samotného konektoru, telo konektoru je obvykle tvorené mosadzou, stredný vodič je medený a použité dielektrikum je typicky PTFE (polytetrafluóretylén), čiže teflon. Pri kvalitnejších konektoroch sa stretávame i s pozlátením určitých častí, čo výrazne zlepšuje vodičnosť a celkovú kvalitu konektoru. Impedancia sa pohybuje na hodnote 50Ω a konektor je väčšinou určený do hraničnej frekvencie 20 GHz.

Po definovaní parametrov antény, výbere vhodného substrátu, spôsobu napájania a samotného konektoru bolo možné pristúpiť k odvodeniu rozmerov antény. Ako prvý parameter, ktorý potrebujeme poznať a zároveň bude hrať významnú rolu pri odvodení rozmerov je vlnová dĺžka. Vzťah 6.1 vyjadruje závislosť vlnovej dĺžky λ na frekvencii f pri danej rýchlosti svetla c .

$$\lambda = \frac{c}{f} [m] \quad (6.1)$$

Po dosadení do vzťahu 6.1 pre frekvencie 2.45 GHz a 5.5 GHz dostávame:

$$\lambda_{2.45GHz} = \frac{299\,792\,458}{2.45 \cdot 10^9} \doteq 0.12236\,m \doteq 122.36\,mm \quad (6.2)$$

$$\lambda_{5.5GHz} = \frac{299\,792\,458}{5.5 \cdot 10^9} \doteq 0.05451\,m \doteq 54.51\,mm \quad (6.3)$$

Ako druhý parameter je potrebné poznať je tzv. efektívna relatívna permitivita. Z predchádzajúcich kapitol, z teórie planárnych je známe, že mikropásiková, alebo inak planárna anténa pozostáva z tenkého mikropásika, ktorý je umiestnený na dielektrickom substráte, ktorý je daný svojou relatívnou permitivitou. Samotný mikropásik je v podstate nehomogénna linka s dvomi dielektrikami, ktoré sú vzduch a samotný substrát. Z dôvodu tohto stavu je potrebné zaviesť už spomenutú efektívnu relatívnu permitivitu. Vzťah pre výpočet tohto parametru sa líši v závislosti na pomere šírky mikropásika w a výšky substrátu h . V tomto prípade je tento pomer vyšší ako 1, čo umožňuje využiť vzťah:[26]

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \left[\frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 12\left(\frac{h}{w}\right)}} \right] [-] \quad (6.4)$$

Pre šírku mikropásika 1.7 mm, pri výške substrátu 1.5 mm a relatívnej permitivite 4.55 po dosadení do vzťahu 6.4 dostávame:

$$\epsilon_{eff} = \frac{4.55 + 1}{2} + \left[\frac{4.55 - 1}{2\sqrt{1 + 12\left(\frac{1.5 \cdot 10^{-3}}{1.7 \cdot 10^{-3}}\right)}} \right] \doteq 3.296 \quad (6.5)$$

Pre šírku mikropásika 2.3 mm, pri nezmenených parametroch po dosadení dostávame:

$$\epsilon_{eff} = \frac{4.55 + 1}{2} + \left[\frac{4.55 - 1}{2\sqrt{1 + 12\left(\frac{1.5 \cdot 10^{-3}}{2.3 \cdot 10^{-3}}\right)}} \right] \doteq 3.372 \quad (6.6)$$

Pre vlnovú dĺžku vzhľadom na efektívnu relatívnu permitivitu substrátu ϵ_{eff} a frekvenciu f platí vzťah:[26]

$$\lambda = \frac{299\,792\,458}{f \cdot \sqrt{\epsilon_{eff}}} [m] \quad (6.7)$$

Zo vzťahov 6.5 a 6.6 je zrejmé, že medzi efektívnymi relatívnymi permitivitami pre obe šírky mikropásika je minimálny rozdiel. Keďže výpočty slúžia na odvodenie približných parametrov a nie na presný návrh, budeme preto pre zjednodušenie uvažovať efektívnu relatívnu permitivitu zo vzťahu 6.6.

Po dosadení do vzťahu 6.7 dostávame:

$$\lambda_{2.45GHz} = \frac{299\,792\,458}{2.45 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{3.296}} \doteq 67.45 \text{ mm} \quad (6.8)$$

$$\lambda_{5.5GHz} = \frac{299\,792\,458}{5.5 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{3.296}} \doteq 30.04 \text{ mm} \quad (6.9)$$

Zo vzťahov je zrejmé, že v dielektriku dochádza k skráteniu vlnovej dĺžky. Keďže pre návrh viacpásmovej antény neexistuje presný návod, či výpočetný vzťah, vypočítaná vlnová dĺžka v dielektriku bude slúžiť ako odrazový bod a pri návrhu je potrebné tento fakt brať do úvahy.

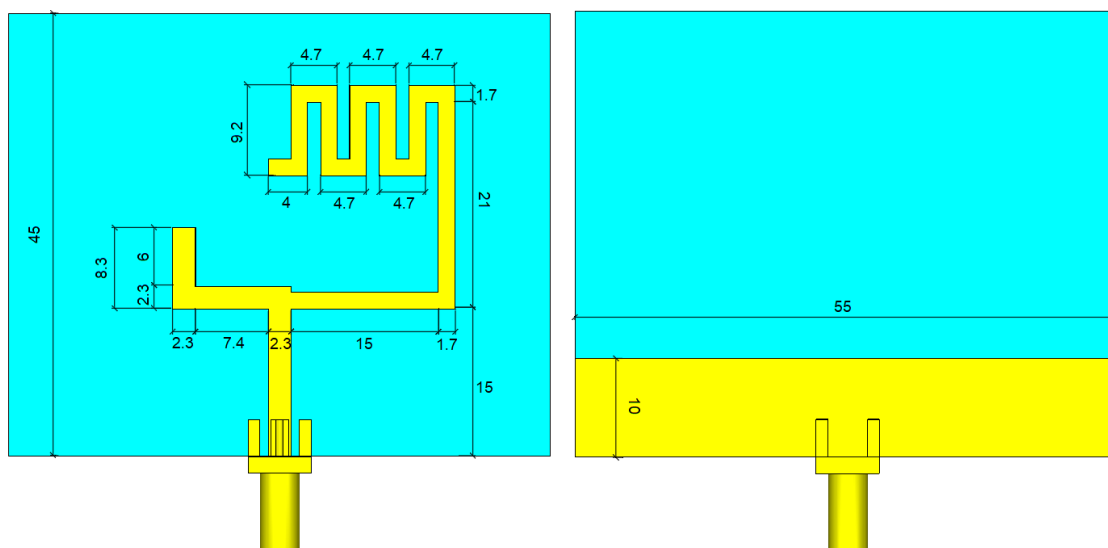
6.3 Modelovanie a simulácia v nástroji CST Studio

Po definovaní minimálnych požiadavkou na anténu, výbere spôsobu napájania a odvodení základných parametrov bolo možné postúpiť k práci s nástrojom CST Studio. Ešte pred samotným modelovaním antény bolo potrebné určiť, ktoré výsledky simulácií budú kľúčové pre dosiahnutie požiadavkou na anténu a zároveň budú slúžiť ako odrazový bod k následnej optimalizácii. Ako prvý výsledok simulácie, ktorému je potrebné venovať pozornosť je parameter S_{11} . Tento parameter v stručnosti vyjadruje útlm odrazenej energie od impedančného neprispôsobenia. Prostredníctvom parametru S_{11} sme následne schopní určiť rezonančnú frekvenciu i šírku pásma antény. Pre správne fungovanie antény v danom frekvenčnom pásme by hodnota parametru S_{11} nemala prekročiť hodnotu -10 dB. Obdobne na tom je i parameter PSV, ktorý vychádza s parametru S_{11} a v danom pásme by nemal prekročiť hodnotu 2.0: 1. Ďalší, pre návrh podstatný parameter je efektivita antény, ktorá udáva pomer medzi množstvom vyžiarenej energie a množstvom energie, ktorá je do antény dodaná. V ideálnom svete by hodnota efektivity dosahovala 100 %, avšak v realite sa hodnota efektivity pohybuje typicky na 50 až 60 %. Všetky spomenuté parametre, a síce S_{11} , PSV a efektivita sú mimo iných priamo výsledkom simulácie v nástroji CST Studio a možno ich hľadať v priečinku "1D Results". Posledný parameter, na ktorý sú kladené minimálne požiadavky, a síce zisk, vyjadruje koľkokrát väčší prijímací výkon anténa poskytuje v porovnaní s dokonale všesmerovou anténou. Tento parameter možno hľadať v priečinku "Farfields", kde mimo iné je možno dostať informácie o smerovosti, a vyžarovacích diagramoch antény, ktoré možno graficky zobrazit.

Prvý krok samotného modelovania pozostával z definovania vlastností substrátu navrhovanej antény. Nástroj CST Studio vo svojom základe obsahuje hneď niekoľko typov substrátov, kedy súčasťou tejto základnej knižnice je i materiál FR4, ktorý sa však svojimi vlastnosťami výrazne odlišuje od materiálu, ktorý bol zvolený v predchádzajúcej kapitole. Bolo teda potrebné materiál novo definovať s ohľadom na relatívnu permitivitu a stratovosť dielektrika.

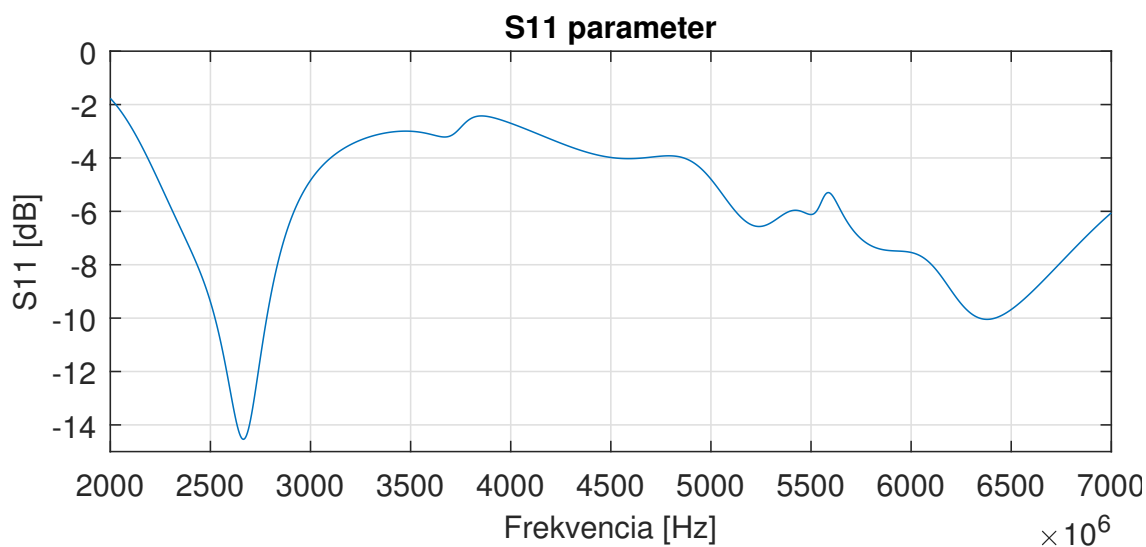
Po vytvorení nového typu materiálu bolo následne možné pristúpiť k procesu samotného modelovania antény. Pri vytváraní viacpásmového modelu bolo využitých viacero metód popísaných

v kapitole 4.7. Ako prvý krok návrhu bolo potrebné vytvoriť samotný substrát s novo definovanými vlastnosťami. Hrúbka substrátu bola volená na hodnotu 1.5 mm, nakoľko výška substrátu vychádzala z údajov priamo od výrobcu, nebolo možné túto hodnotu voľiť ľubovoľne. Obdobne je na tom i hrúbka medenej vrstvy, ktorá sa nachádza z oboch strán substrátu a dosahuje hodnotu $35\text{ }\mu\text{m}$. Na vrchnej strane substrátu boli vzhľadom na vyššie odvodené hodnoty vlnovej dĺžky umiestnené 2 vyžarovacie prvky. Jeden prvok nadobúda meandrovitý tvar, druhý prvok bol volený do tvaru L. Oba tieto prvky sú vzájomne prepojené, taktiež sú napájané spoločným VF konektorom. Dĺžka oboch prvkov bola z predchádzajúcich osobných skúseností volená mierne dlhšie vzhľadom na vyššie odvodenú vlnovú dĺžku. Pri návrhu je taktiež uvažovaná zemiaca rovina, ktorá je umiestnená na spodnej strane substrátu. Mimo samotnej antény bolo potrebné namodelovať i spôsob napájania. Ako už bolo spomenuté, anténa je napájaná VF konektorom typu SMA(f). Konektor bol namodelovaný podľa katalógových hodnôt výrobcu a v rámci simulácie bol umiestnený tak, aby jeho stredový pin priliehal k vodivému mikropásiku na vrchnej strane substrátu, spodné dve nožičky zase k zemiacej ploche na strane spodnej. Do simulácie je zahrnutá i vrstva cínu v oblasti dotyku stredového pinu konektoru a mikropásika, pre čo najvernejší výsledok simulácie. Model prvotného návrhu možno pozorovať na nasledujúcom obrázku č. 6.1. Simulácia bola nastavená s frekvenčným rozsahom 2 – 7 GHz a dostatočnou presnosťou, aby bolo možné návrh analyzovať v rámci požadovaných pásiem, ale i prípadných pásiem medzi nimi.



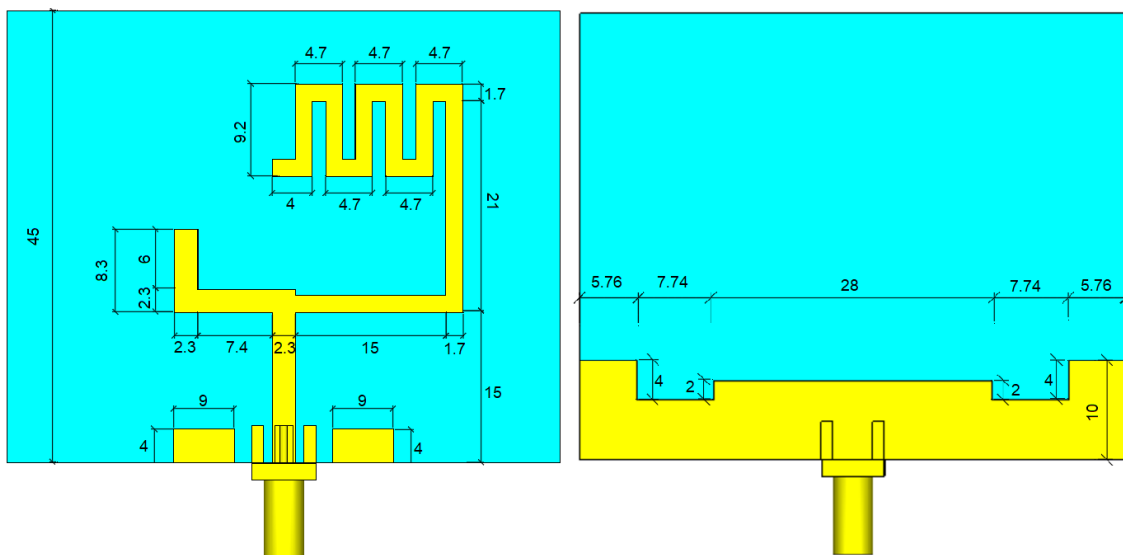
Obr. 6.1: Prvotný návrh antény

Výsledok simulácie na grafe 6.2 potvrdil viacpásmový charakter, anténa však rezonovala v oblasti 2665 MHz a 6390 MHz, inými slovami, model nedokázal operovať v požadovaných pásmach. Hodnota parametru S_{11} taktiež nadobúdala vysoké hodnoty, preto bolo potrebné pristúpiť k ďalším úpravám, nakoľko tento model nie je vhodný pre praktické využitie a nie je ho možné použiť v požadovaných pásmach.



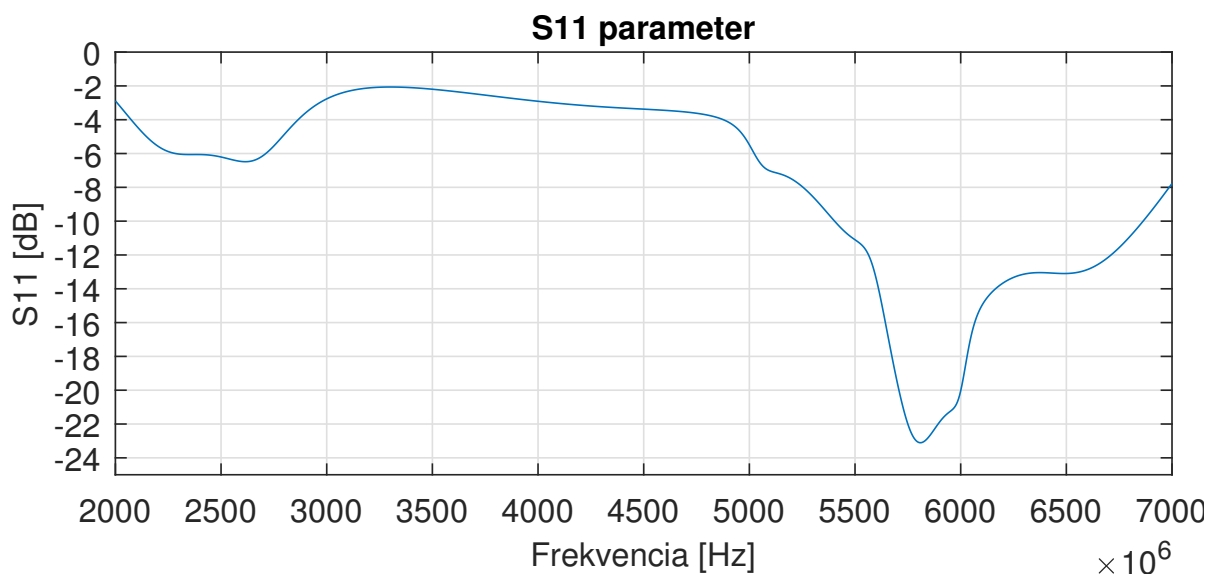
Obr. 6.2: Parameter S_{11} prvotného návrhu

Po nasimulovaní a overení viacerých konfigurácií nasledovala úprava modelu, ktorá zahŕňala využitie parazitných rezonátorov, ktoré boli umiestnené v spodnej polovici vrchnej strany antény, v blízkosti miesta kontaktu napájacieho konektora a mikropásiku. Okrem využitia parazitných rezonátorov, ktoré však nie sú napájané priamo mikropásikom, došlo i k zmene podoby zemiacej roviny, kedy umiestnenie zostalo oproti prvotnému modelu nemenné, avšak do monotónneho jednoduchého obdĺžnikového tvaru bola umiestnená štrbina v tvare hranatého obráteného písmena U. Upravený model možno pozorovať na nasledujúcom obrázku č. 6.3

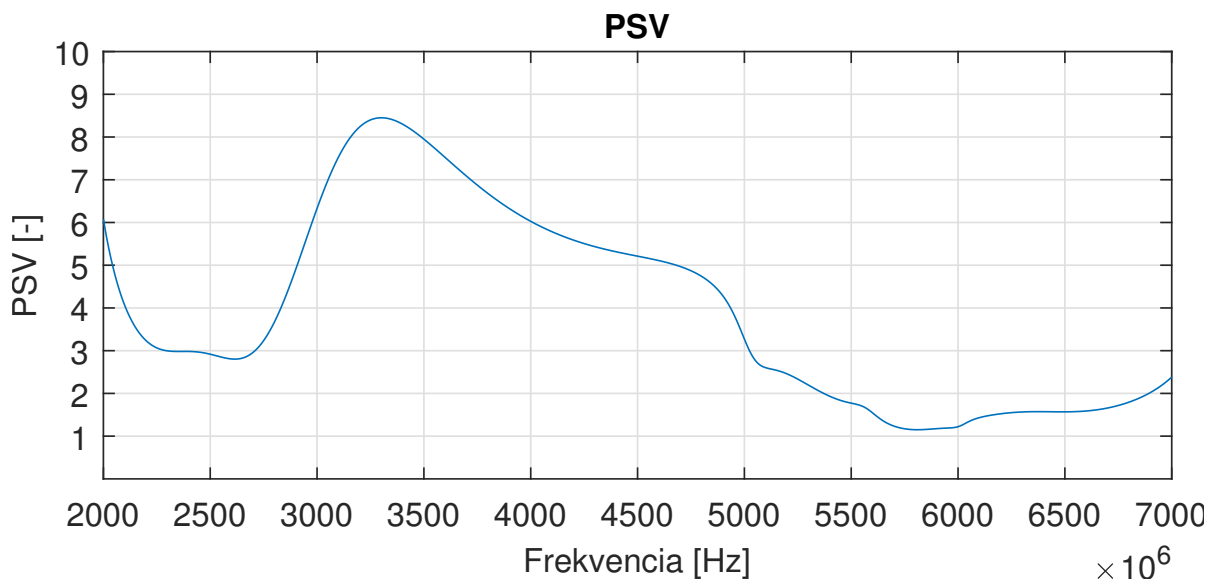


Obr. 6.3: Upravený prvotný návrh antény

Z grafu parametru S_{11} 6.4 a PSV 6.5, ktoré sú výstupom simulácie upraveného modelu je na prvý pohľad zrejmé, že i pre tento model je prítomná viacpásmová charakteristika antény. Došlo k výraznému zlepšeniu parametru S_{11} a posunu rezonančnej frekvencie z oblasti 6390 MHz do oblasti 5800 MHz, čo je jedna z kľúčových oblastí pre tento návrh. V nižších frekvenciách, a síce v okolí 2500 MHz naopak došlo k zhoršeniu vlastností antény, avšak tento nežiadúci aktuálny stav bude v následných optimalizáciách vylepšený.



Obr. 6.4: Parameter S_{11} upraveného prvotného návrhu



Obr. 6.5: PSV upraveného prvotného návrhu

6.4 Optimalizácia návrhu

Nástroj CST Studio vo svojom základe ponúka 2 možnosti optimalizácie ľubovoľného návrhu. Prvá možnosť pozostáva z využitia funkcie Parameter Sweep. Táto funkcia funguje na veľmi jednoduchom princípe, kedy síce nevyužíva žiaden optimalizačný algoritmus, avšak umožňuje nastaviť hraničné hodnoty ľubovoľného parametru návrhu a šírku kroku, s ktorým je tento parameter pozmeňovaný. Funkcia umožňuje kombinovať ľubovoľné množstvo parametrov spolu s ľubovoľným počtom jednotlivých krokov. Po každej definovanej zmene dochádza k novej simulácii, ktorej výsledky sa ukladajú do medzi pamäte, čo po ukončení celkového procesu umožňuje tieto výsledky zobrazit a následne analyzovať. Táto funkcia je obzvlášť vhodná pre veľmi presné a konečné doladenie modelu, taktiež sa výborne hodí na zistenie, ktorý z parametrov návrhu má výrazný vplyv na posun rezonančnej frekvencie, ale i iných výsledných parametrov, či už antény, alebo inej štruktúry.

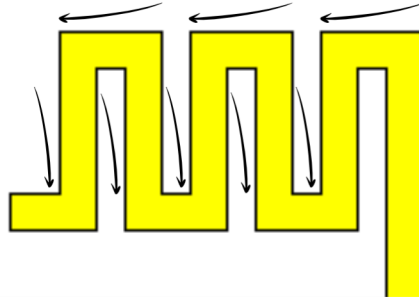
Druhá možnosť, ktorú nástroj CST Studio ponúka je využitie funkcie s názvom Optimizer. Jedná sa o nástroj, ktorý umožňuje optimalizáciu výsledných parametrov návrhu s využitím vhodného algoritmu. Obdobne ako Parameter Sweep, i tento nástroj dovoľuje definovať hraničné hodnoty ľubovoľného parametru návrhu, avšak šírka kroku i počet simulácií závisí od samotného algoritmu. K dispozícii je hneď niekoľko typov algoritmov, vhodnosť ich použitia však závisí od konkrétneho návrhu. V tomto prípade bol využitý algoritmus Trust Region Framework, ktorý sa vyznačuje rýchlosťou a presnosťou, zároveň je však zo všetkých dostupných algoritmov najrobustnejší. Mimo výberu hraničných hodnôt a samotného algoritmu Optimizer taktiež dovoľuje voľbu požadovaného výsledku optimalizácie. Požadovaný výsledok môže byť definovaný vzhľadom na frekvenčné pásmo, ale i z globálneho hľadiska. Optimizer taktiež dovoľuje optimalizovať ľubovoľný parameter vzhľadom na jeho minimum, prípadne maximum, bez nutnosti definovania konkrétnej hodnoty.

Po úprave prvotného modelu sa celkový návrh dostal do bodu, kedy je prítomný viacpásmový charakter antény. Model taktiež rezonuje vo frekvenčných oblastiach 5800 MHz a 2500 MHz, čo sú oblasti blízke tým požadovaným, avšak stále sa od požadovaných líšia. Hodnota parametru S_{11} v oblasti 2500 MHz dosahuje natoľko vysokých hodnôt, že anténa je v praxi pre toto, ale i požadované pásmo nepoužiteľná. Na druhú stranu, oblasť 5800 MHz je na tom výrazne lepšie. Hodnota parametru S_{11} je výrazne nižšia, čo umožňuje v tomto, i v časti požadovaného pásma anténu využiť. Z výsledkov je teda zrejmé, že anténu je potrebné optimalizovať tak, aby spĺňala minimálne definované požiadavky. Momentálny návrh teda slúži ako odrazový bod, o ktorý sa celková optimalizácia bude opierať. Cieľom optimalizácie je teda posunúť rezonančné frekvencie do oblastí 2450 MHz a 5500 MHz s dodržaním minimálnych požiadavkou definovaných v tabuľke č. 6.1.

Ako prvý krok pri optimalizácii bolo potrebné určiť, ktoré parametre návrhu majú najvýraznejší vplyv na posun, ale i hodnotu parametru S_{11} . Pre tento úkon bola volená funkcia Parameter Sweep, ktorá už bola popísaná vyššie. Keďže už pred samotným návrhom bolo zrejmé, že výsledný návrh bude vyrobený pomocou CNC (computer numerical control) frézky, ktorá je daná určitou presnosťou, bolo potrebné na tento ohľad dbať i v procese samotnej optimalizácie.

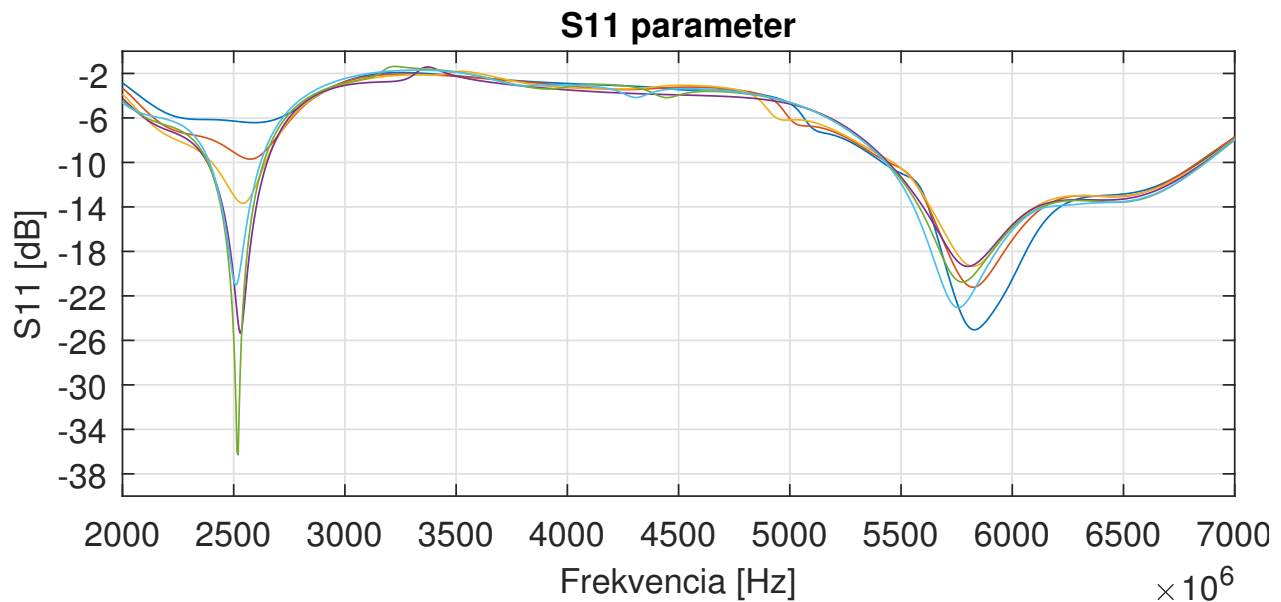
6.4.1 Model č. 1

Po úspešnom dokončení simulácií pomocou funkcie Parameter Sweep vyšlo najavo, že v prvotnom kroku optimalizácie je najvhodnejšie pristúpiť k úprave parametrov mikropásiku umiestneného na vrchnej strane substrátu, konkrétne teda k úprave meandrovitého tvaru mikropásiku a mikropásiku v tvare L. Úprava samotného meandru pozostávala z predĺženia jeho výšky, spolu so zmenou veľkosti medzier medzi jednotlivými meandrovými mikropásikami, čo malo za následok i rozšírenie celého meandrovitého tvaru tak, ako je to znázornené na nasledujúcom obrázku č. 6.6.



Obr. 6.6: Znázornenie úpravy meandru

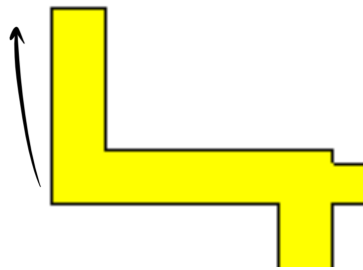
Postupný proces úpravy opísaný v predchádzajúcich riadkoch premietnutý do zmien parametru S_{11} možno sledovať na nasledujúcom grafe 6.7.



Obr. 6.7: Znázornenie úpravy meandru premietnuté do grafu S_{11}

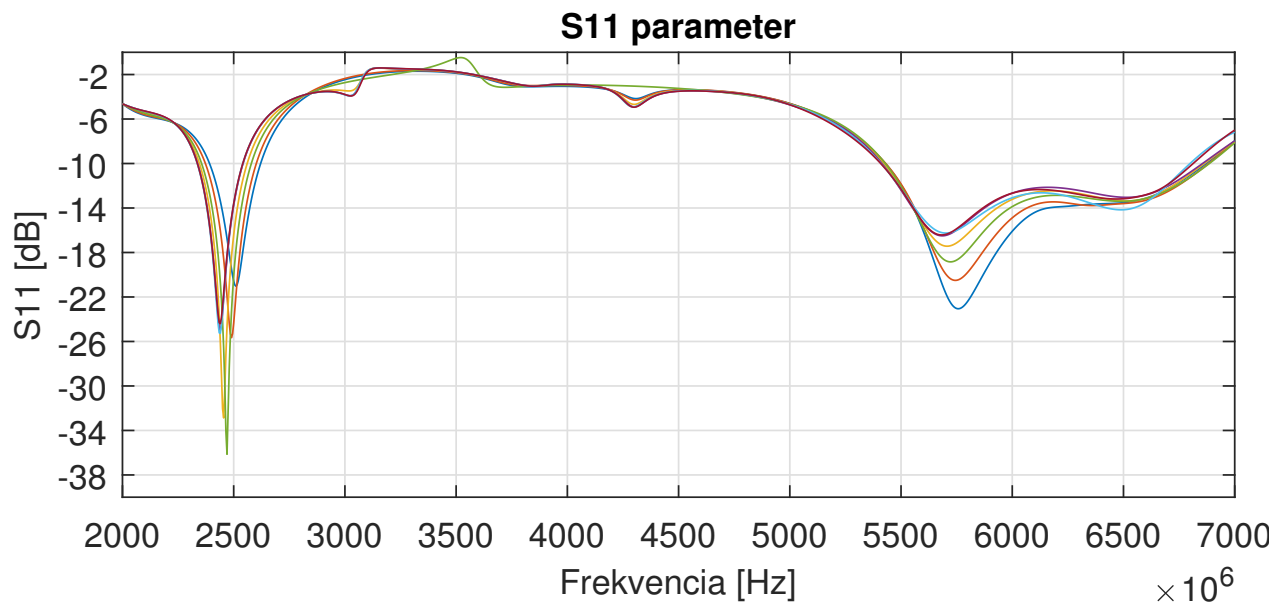
Ako je z grafu 6.6 zrejmé, razantná zmena nastala v oblasti 2500 MHz, kedy došlo k výraznému poklesu hodnoty parametru S_{11} , avšak k posunu do oblasti 2450 MHz pri tomto kroku nedošlo. Čo sa týka oblasti 5800 MHz, v tomto prípade nedošlo k signifikantným zmenám, preto bolo potrebné

pristúpiť k ďalšej, už skôr načrtnutej úprave, a síce k zmene dĺžky časti mikropásiku tvaru L, tak ako je to znázornené na obrázku č. 6.8.



Obr. 6.8: Znázornenie úpravy mikropásiku tvaru L

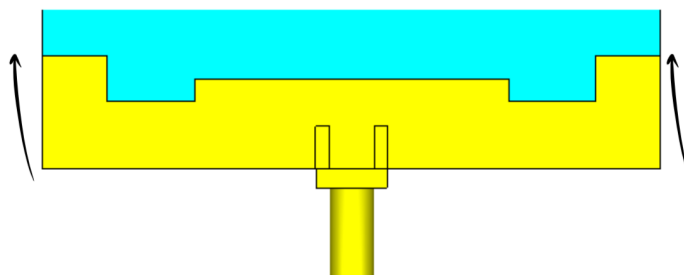
Úpravou mikropásika sa podarilo docieľiť posunu rezonančnej frekvencie z oblasti 2500 MHz do oblasti 2440 MHz. Parameter S_{11} v rámci tejto oblasti dosahuje minimálnej hodnoty -24 dB. Zmena, avšak negatívneho charakteru, nastala i v oblasti 5800 MHz, kedy síce nedošlo k posunu rezonančnej frekvencie, ale došlo k miernemu nárastu hodnoty parametru S_{11} . V rámci aktuálneho kroku optimalizácie taktiež nedošlo len k zmene dĺžky mikropásiku tvaru L, ale nastala i zmena výšky oboch parazitných rezonátorov, avšak táto zmena sa prejavila len mierným poklesom hodnoty parametru S_{11} v oblasti 5800 MHz. Postupný proces úpravy je taktiež možno sledovať na nasledujúcom grafe 6.9.



Obr. 6.9: Znázornenie úpravy mikropásiku tvaru L premietnuté do grafu S_{11}

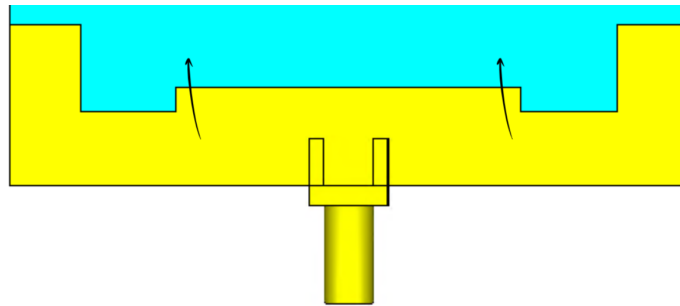
Po dokončení všetkých úprav mikropásika na hornej strane substrátu sa návrh dostal do stavu, kedy je i naďalej potrebné pokračovať v optimalizácii. Celkové doladenie návrhu, a síce prehĺbe-

Ako prvý krok, ktorý bol volený pri úprave zemiacej roviny, bolo zvýšenie celkovej jej výšky, takým spôsobom ako je znázornené na obrázku č. 6.11. Zmena výšky zemiacej plochy antény mala za následok mierny posun rezonančnej frekvencie v oblasti 2440 MHz smerom k nižším hodnotám, naopak výraznejší posun nastal v oblasti 5800 MHz, kedy došlo k posunu rezonančnej frekvencie do oblasti 5450 MHz.



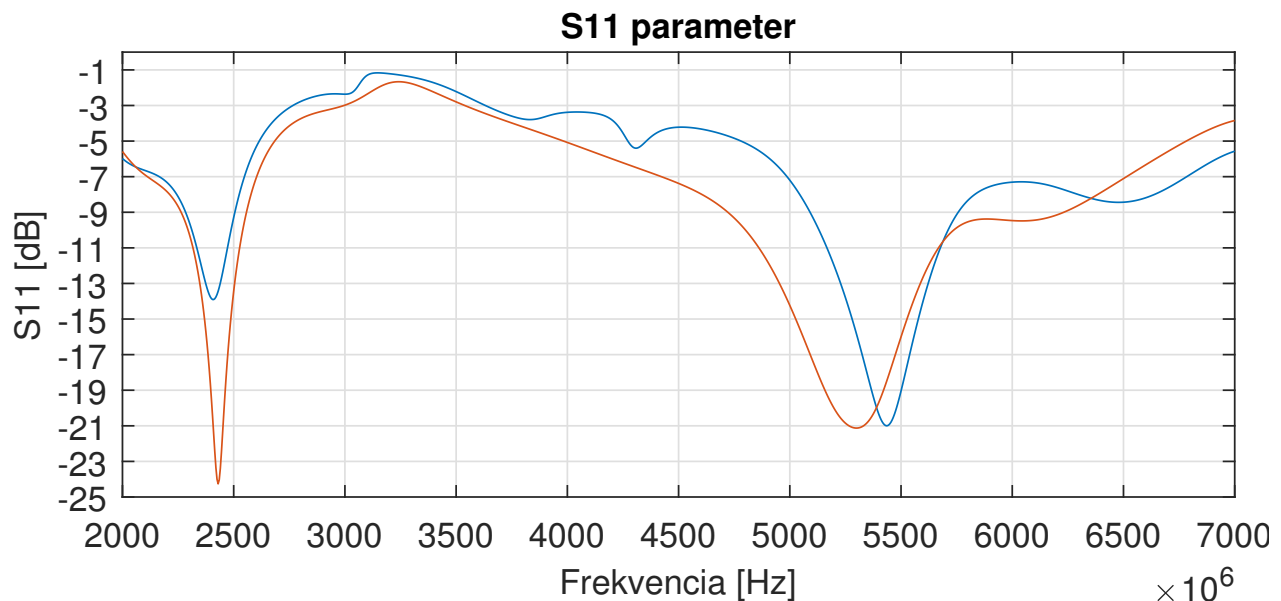
Keďže anténa musí byť schopná pracovať v i pásme 5 GHz so šírkou pásma minimálne 725 MHz, bolo potrebné zabezpečiť rozšírenie pracovného pásma antény, nakoľko v aktuálnom bode optimalizácie bola šírka pásma nedostatočná. Rozšírenie pásma bolo docielené zmenou výšky stredového tvaru na zemiackej rovine, tak ako je to znázornené na nasledujúcom obrázku č. 6.12. Táto

zmena mala mimo rozšírenia pásma za následok i výrazný pokles hodnoty parametru S_{11} v oblasti 2440 MHz.



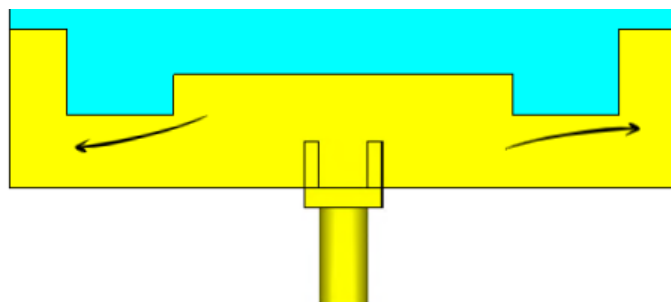
Obr. 6.12: Znázornenie úpravy výšky stredového tvaru zemiacej roviny

Spomínané rozšírenie pásma je na prvý pohľad zrejmé i z grafu parametru S_{11} na obrázku č. 6.13.

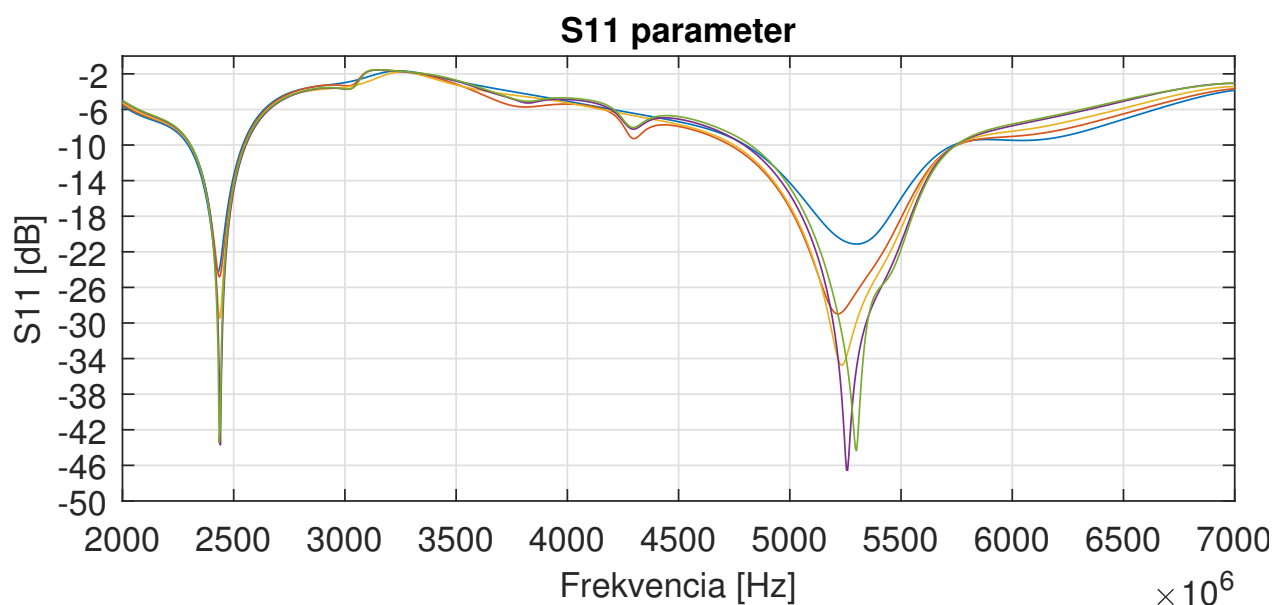


Obr. 6.13: Rozšírenie pásma znázornené v grafe S_{11}

Finálne doladenie návrhu bolo docielené prostredníctvom úpravy postranných štrbín v zemiacej rovine, konkrétne ich zúžením a posunom smerom k okrajom antény. Táto úprava mala za následok výrazné prehĺbenie hodnoty parametru S_{11} v oboch pásmach, konkrétne v pásme 2.4 GHz došlo k posunu minima parametru S_{11} na frekvenciu 2435 MHz a zároveň k jeho výraznému poklesu, až na hodnotu -43 dB. Obdobne i v pásme 5 GHz došlo k posunu minima parametru na frekvenciu 5300 MHz a zároveň došlo k výraznému zníženiu hodnoty až na -44 dB. Názorná ukážka spôsobu úpravy štrbín je znázornená na obrázku č. 6.14. Túto úpravu, premietnutú do grafu parametru S_{11} , možno opäť sledovať na obrázku č. 6.15.



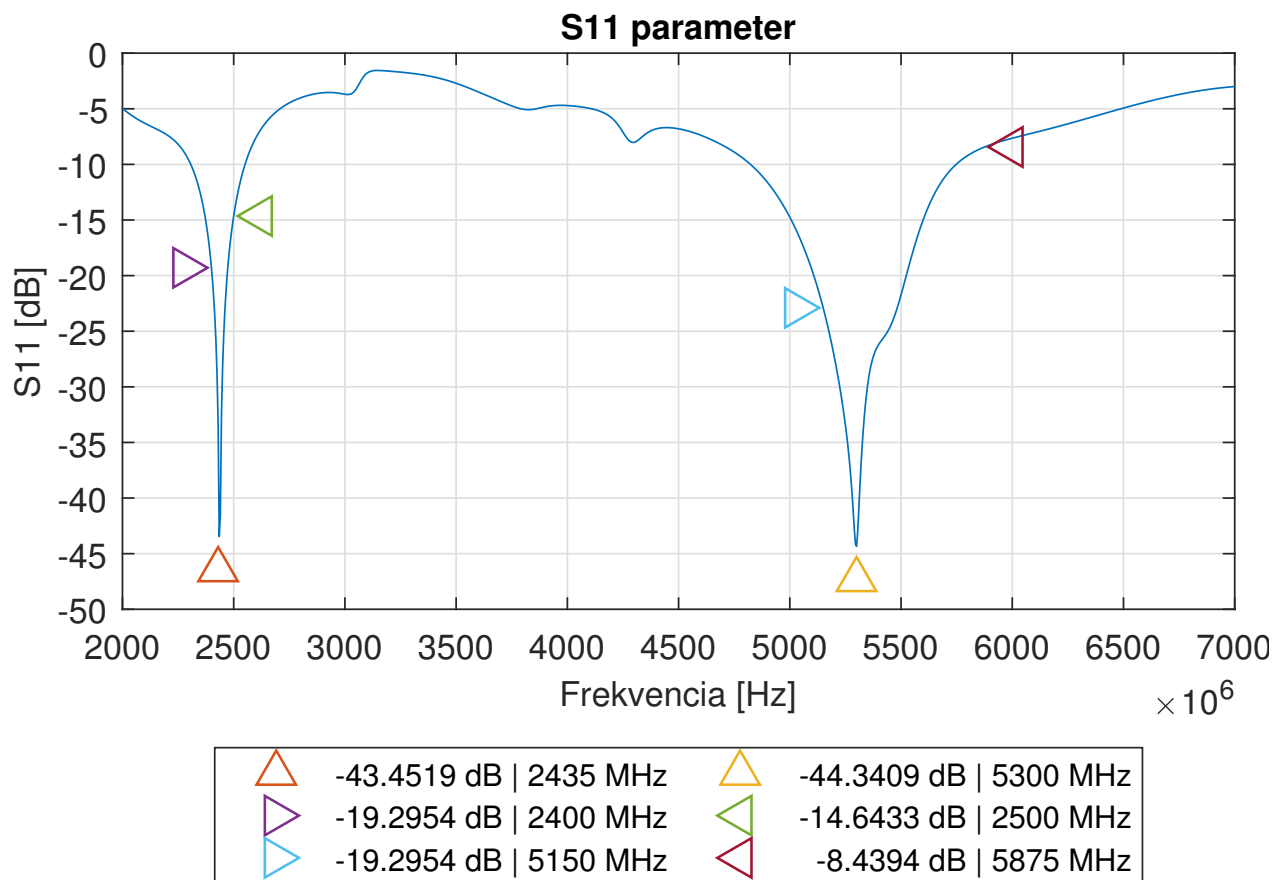
Obr. 6.14: Znázornenie úpravy štrbín zemiacej roviny



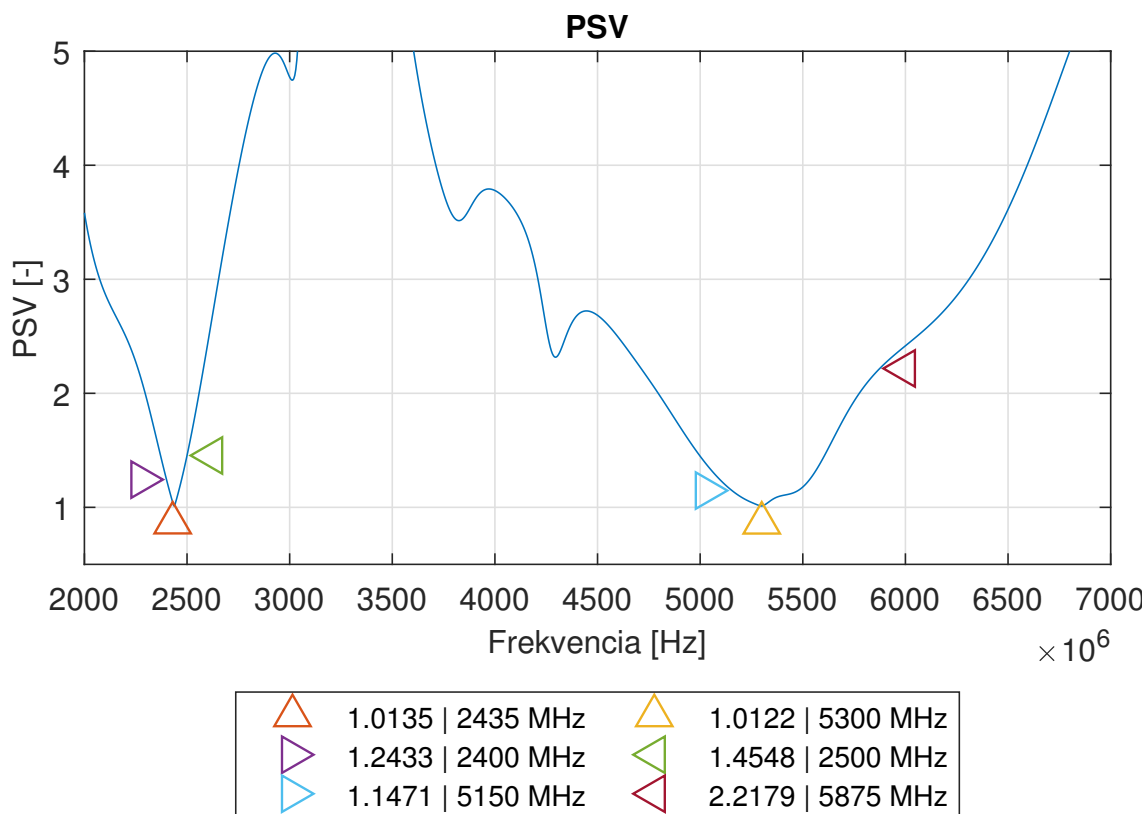
Obr. 6.15: Znázornenie úpravy štrbín zemiacej roviny premietnuté do grafu S_{11}

Výsledkom optimalizácie je teoreticky funkčný model antény, ktorá je schopná operovať v pásmach 2.4 a 5 GHz. V predchádzajúcich riadkoch, v bode dokončovania optimalizácie, už boli jemne načrtnuté vlastnosti finálneho modelu. Anténa teda rezonuje, ako už bolo spomenuté v dvoch pásmach a to v pásme 2.4 a 5 GHz. V pásme 2.4 GHz hodnota parametru S_{11} v minime, ktoré sa nachádza na frekvencii 2435 MHz, dosahuje -43.45 dB (PSV 1: 1.01). V rámci krajných bodov pásma 2400 – 2500 MHz, v ktorom operujú vybrané technológie štandardu 802.11, parameter S_{11} dosahuje hodnoty -19.30 dB (PSV 1: 1.24) pre 2400 MHz a -14.64 dB (PSV 1: 1.45) pre 2500 MHz. Celková šírka pásma, kedy S_{11} dosahuje hodnotu nižšiu ako -10 dB (PSV 1: 2.0) je ohraničená bodmi 2310 a 2550 MHz, čo tvorí celkovú šírku 240 MHz. V rámci pásma 5 GHz parameter S_{11} dosahuje minimum v bode 5300 MHz s hodnotou -44.34 dB (PSV 1: 1.01).

V rámci krajných bodov pásma 5150 – 5875 MHz, v ktorom taktiež operujú vybrané technológie štandardu 802.11, parameter S_{11} dosahuje hodnoty -19.30 dB (PSV 1: 1.15) pre 5150 MHz a -8.44 dB (PSV 1: 2.22) pre 5875 MHz. Celová šírka pásma, kedy opäť dochádza k poklesu S_{11} pod -10 dB (PSV 1: 2.0) je daná hraničnými bodmi 4825 a 5745 MHz, čo dáva výslednú šírku pásma až 920 MHz. Všetky spomenuté hodnoty a celkový graf parametru S_{11} je znázornený na obrázku 6.16, resp. 6.17.

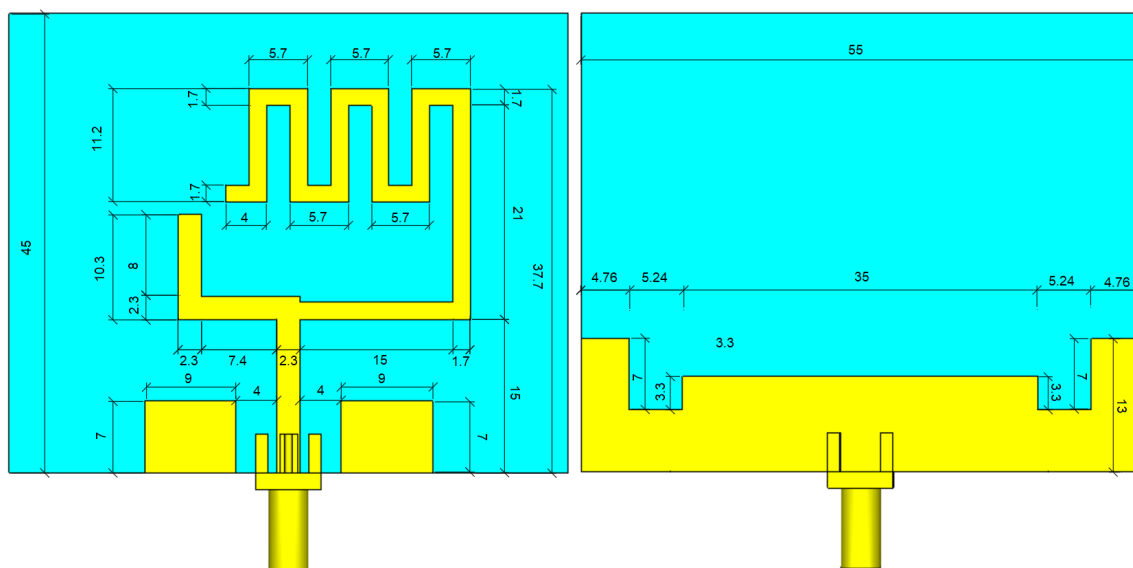


Obr. 6.16: Graf parametru S_{11} optimalizovaného modelu č. 1



Obr. 6.17: Graf PSV optimalizovaného modelu č. 1

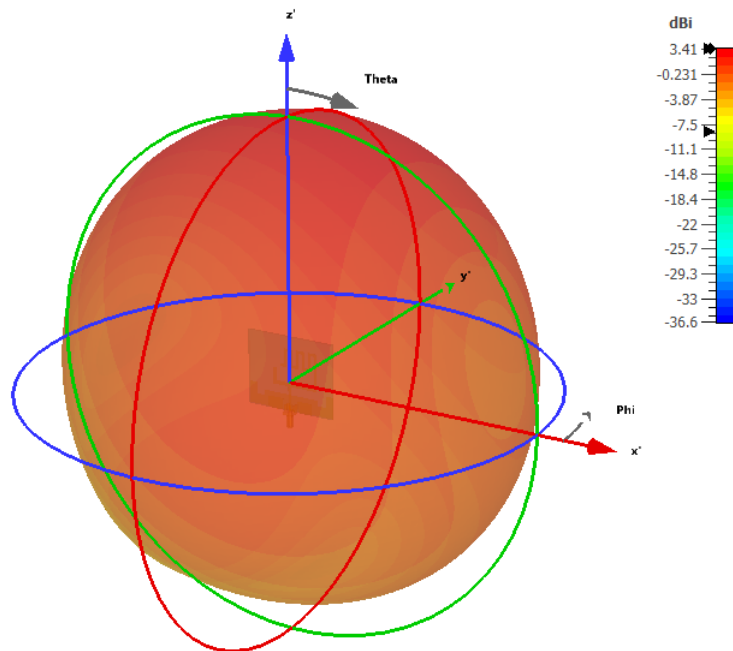
Z predchádzajúcich riadkov je zrejmé, že v procese optimalizácie bola zmenených rada rozmerov. Rozmery finálneho optimalizovaného modelu je možno sledovať na nasledujúcom obrázku č. 6.18.



Obr. 6.18: Rozmery optimalizovaného modelu č. 1

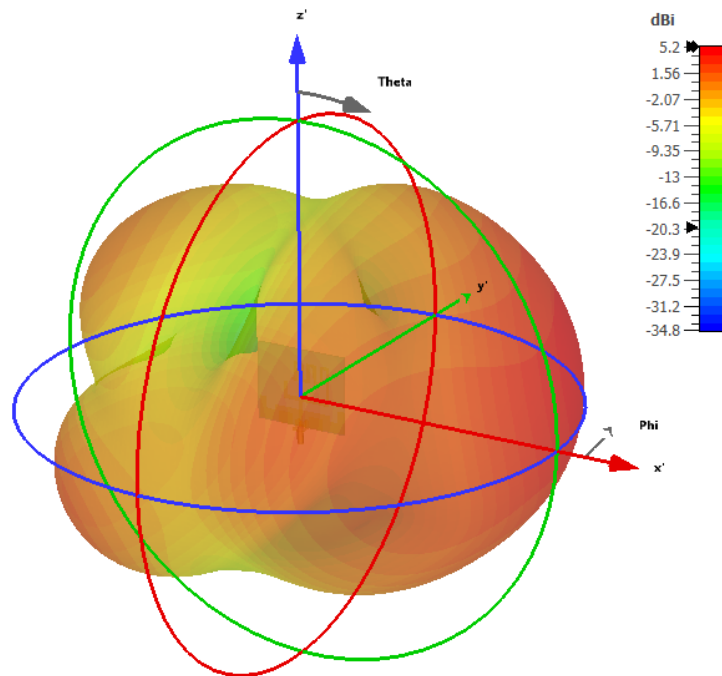
Anténa je primárne určená pre pásma 2.4 GHz a 5 GHz, avšak určité verzie štandardu 802.11 operujú i vo vyšších frekvenčných oblastiach, konkrétne v pásme 60 GHz. Výsledky simulácie ukazujú, že hodnota parametru S_{11} dosahuje maximálne -10 dB v rámci oblastí 57.3 – 61.9 GHz, 64.95 – 67.3 GHz, 68 – 69.3 GHz a 69.5 – 71.2 GHz. Naopak hodnota parametru S_{11} antény v rámci pásma 6 GHz pohybuje nad -10 dB.

Ďalší, nemenej dôležitý parameter, ktorý je nutné spomenúť je zisk antény. V prípade tohto modelu bolo v rámci simulácie nastavených niekoľko monitorov na rôznych frekvenciách, v rámci ktorých následne došlo i k výpočtu zisku. Nástroj CST Studio dokáže v rámci týchto monitorov zobraziť 3D vyžarovaciu charakteristiku, ale i vertikálne, či horizontálne rezy. Pre prehľadnosť v tejto kapitole budú zobrazené vyžarovacie charakteristiky na konkrétnych frekvenciách, ktoré reprezentujú stredy oboch pásiem. Charakteristiky z hraničných bodov oboch pásiem možno pozorovať v prílohe A. Čo sa týka zisku v pásme 2.4 GHz, monitor bol nastavený na frekvenciu 2450 MHz, čomu zodpovedá stred pásma. Z 3D náhľadu vyžarovacieho diagramu, ktorý je možno vidieť na obrázku č. 6.19 vyplýva, že zisk sa v tomto bode pohybuje na maximálnej úrovni 3.41 dBi. Anténa v tomto pásme na prvý pohľad pôsobí všesmerovo, avšak hlavný smer vyžarovania možno pozorovať v oblasti nad meandrovitou časťou antény.



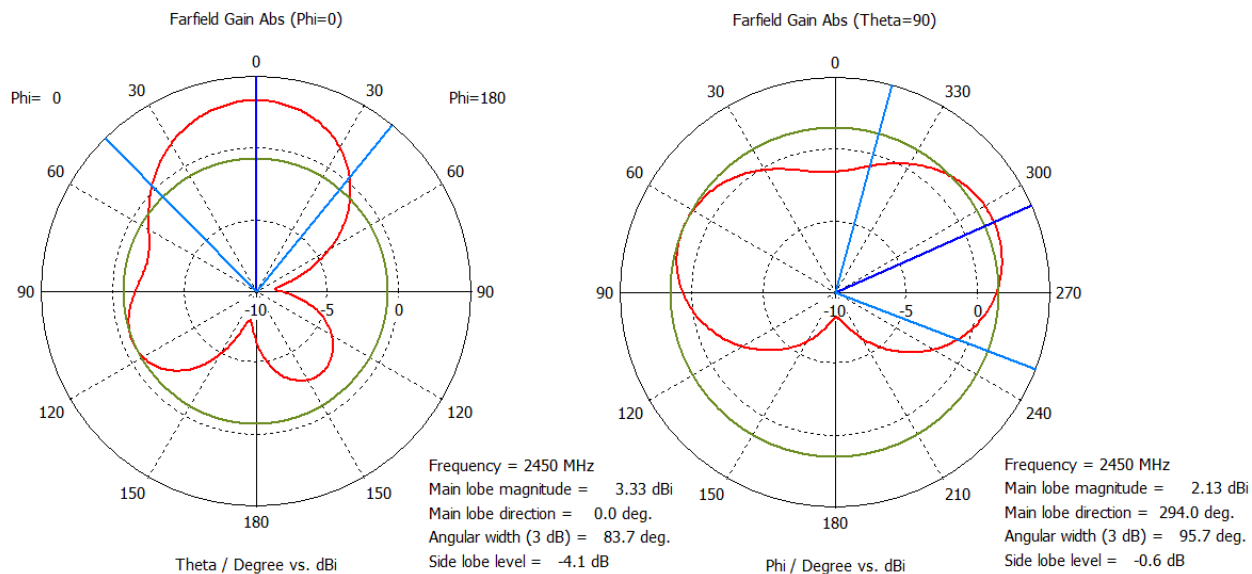
Obr. 6.19: 3D vyžarovací diagram 2450 MHz (model č. 1)

Čo sa týka pásma 5 GHz, z obrázku 6.20 vyplýva, že zisk antény je v tomto prípade o niečo vyšší a v strede pásma na frekvencii 5512.5 MHz dosahuje v maxime 5.2 dBi. I v tomto prípade anténa na prvý pohľad vyžaruje všesmerovo, avšak hlavný smer vyžarovania pozorujeme v oblasti pravej strany antény.



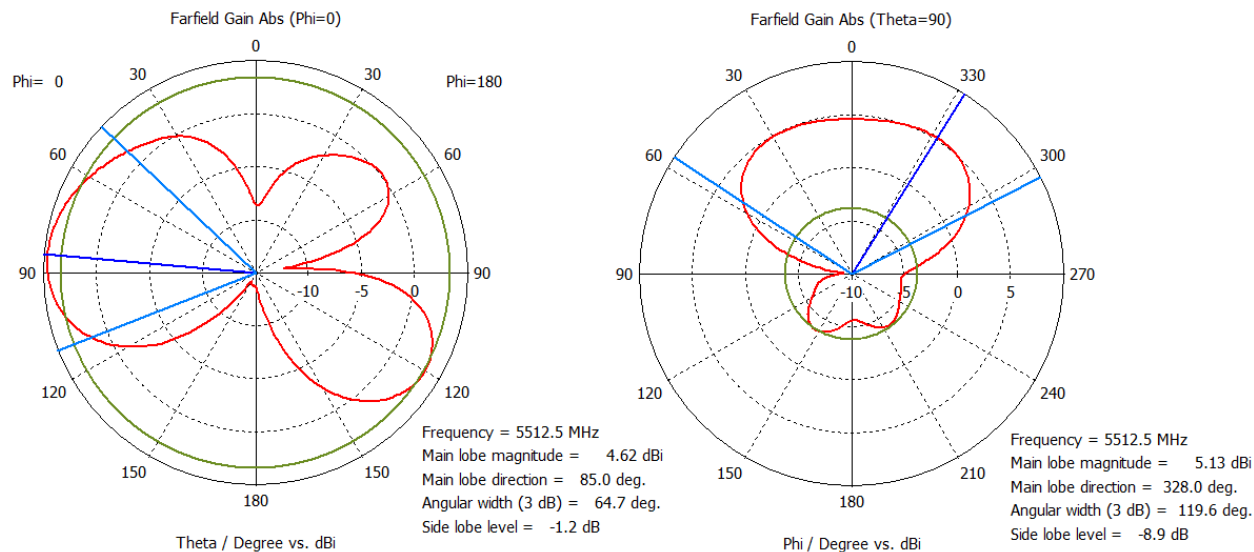
Obr. 6.20: 3D vyžarovací diagram 5512.5 MHz (model č. 1)

V prípade vertikálneho rezu smerovej charakteristiky pri frekvencii 2450 MHz na obrázku č. 6.21 možno pozorovať maximálnu hodnotu zisku 2.13 dBi. Vyžarovací uhol dosahuje v tomto reze hodnotu 95.7°. Čo sa týka horizontálneho rezu, hodnota zisku je mierne vyššia a dosahuje v maxime 3.33 dBi. Vyžarovací uhol v rámci toho rezu dosahuje 83.7°.



Obr. 6.21: Smerová charakteristika 2450 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 1)

Pri frekvencii 5512.5 MHz v rámci vertikálneho rezu smerovej charakteristiky na obrázku č. 6.22 možno zase pozorovať maximálnu hodnotu zisku 5.13 dBi s vyžarovacím uhlom 119.6°. V rámci rezu horizontálneho sa maximálna hodnota zisku pohybuje na 4.62 dBi s vyžarovacím uhlom 64.7°. Anténa v oboch pásmach nadobúda lineárnu polarizáciu.

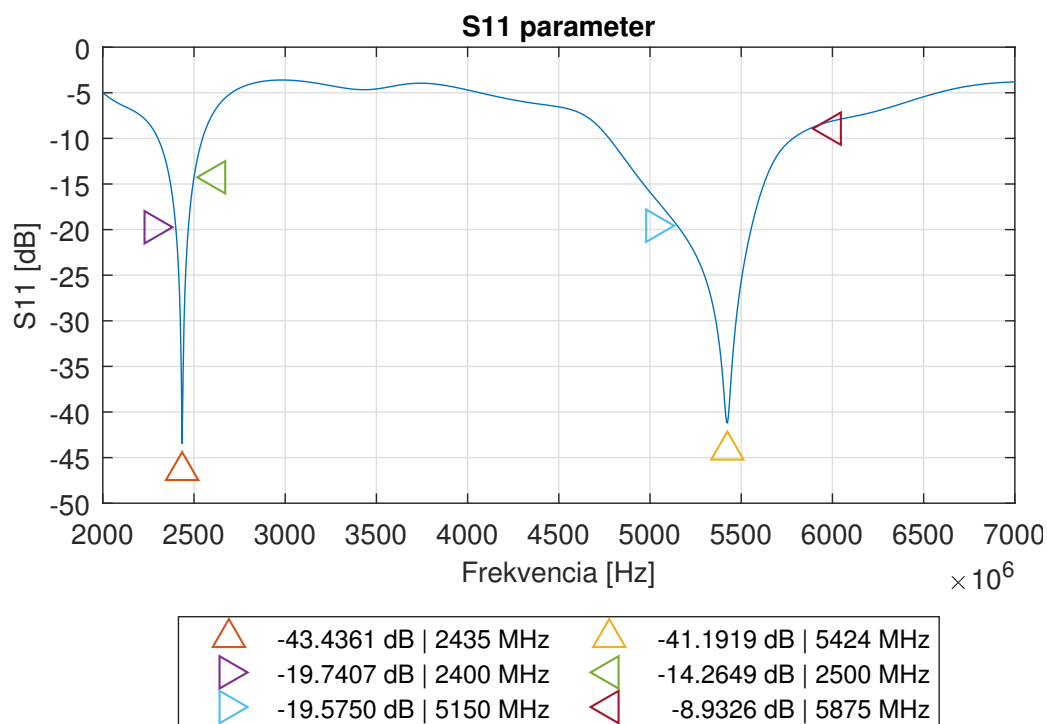


Obr. 6.22: Smerová charakteristika 5512.5 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 1)

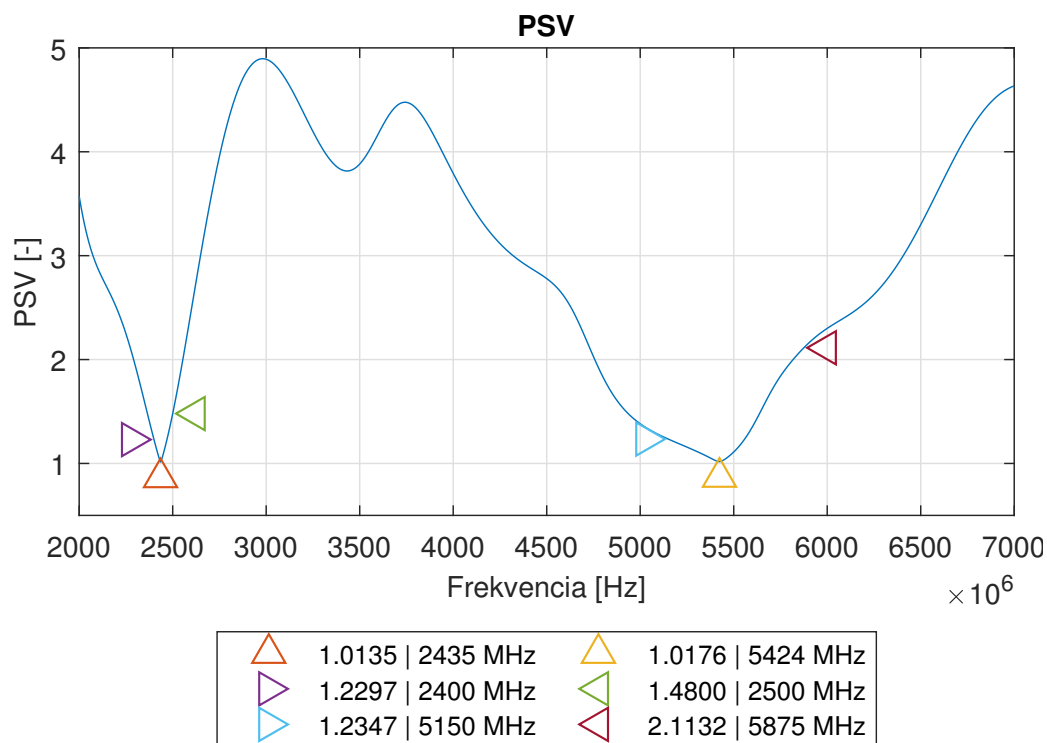
Jeden z posledných parametrov, ktorý bude spomenutý je efektivita antény. Význam efektivity už bol popísaný v predchádzajúcich riadkoch a v rámci pásma 2400 – 2500 MHz dosahuje hodnotu minimálne 85.9 %, v rámci pásma 5150 – 5875 MHz zase 69.4 %.

6.4.2 Model č. 2

V rámci poznatkov z procesu optimalizácie prvého modelu sa podarilo dospieť i k modelu druhému. Hlavný rozdiel oproti modelu číslo 1 spočíva v zmene parazitných rezonátorov, ktoré sú umiestnené na vrchnej strane substrátu. Konkrétne teda zmenou výšky a šírky oboch elementov sa podarilo doceliť zmenu priebehu parametru S_{11} . V krajných bodov pásma 2400 – 2500 MHz parameter S_{11} dosahuje hodnoty -19.74 dB (PSV 1: 1.23) a -14.26 dB (PSV 1: 1.48). Pozícia minima sa oproti prvému modelu nezmenila a dosahuje -43.44 dB (PSV 1: 1.1.01). V rámci pásma 5150 – 5875 MHz parameter S_{11} dosahuje hodnoty -19.58 dB (PSV 1: 1.23) a -8.93 dB (PSV 1: 2.11). V tomto prípade taktiež došlo k zmene pozície minima na frekvenciu 5424 MHz, kde S_{11} dosahuje -41.19 dB (PSV 1: 1.02). Celková šírka pásma antény je daná hraničnými bodmi 2305 MHz a 2545 MHz, čo dáva výslednú šírku pásma 240 MHz. Druhé pásmo antény, ktoré je zase dané hraničnými bodmi 4780 MHz a 5780 MHz, čo vytvára šírku pásma až 1 GHz. Všetky spomenuté hodnoty možno pozorovať na grafoch č. 6.23 a 6.24.

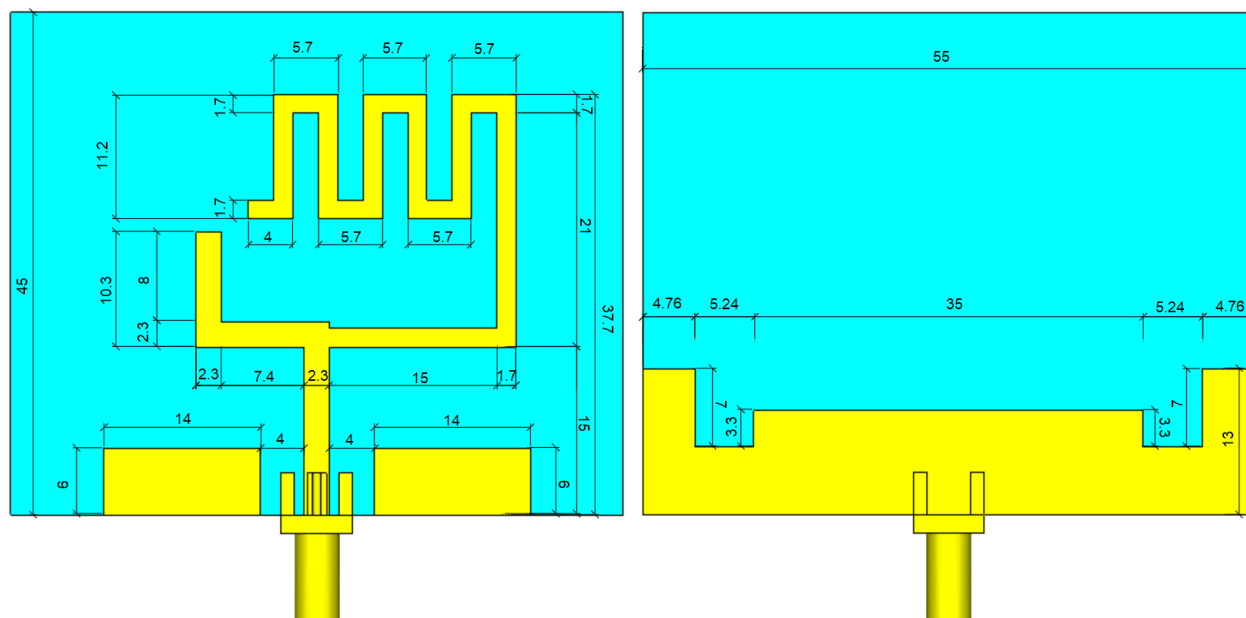


Obr. 6.23: Graf parametru S_{11} optimalizovaného modelu č. 2



Obr. 6.24: Graf PSV optimalizovaného modelu č. 2

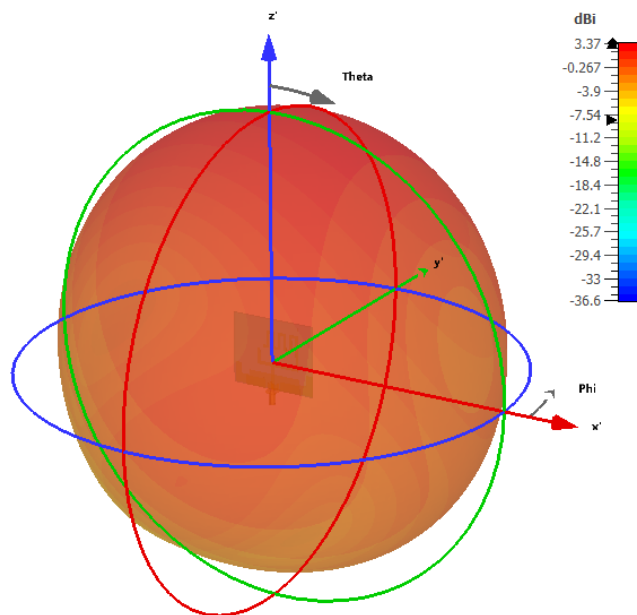
Rozmery finálneho optimalizovaného modelu je možno sledovať na nasledujúcom obrázku č. 6.25.



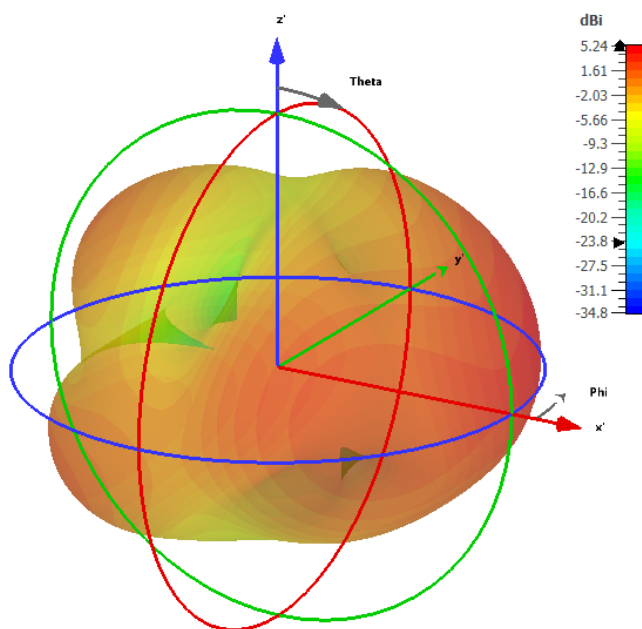
Obr. 6.25: Rozmery optimalizovaného modelu č. 2

I v tomto prípade prebehla simulácia i v pásme 60 GHz. Výsledky simulácie ukazujú, že hodnota parametru S_{11} dosahuje maximálne -10 dB v rámci oblastí 57.1 – 62.1 GHz, 64.4 – 69.9 GHz a 70.4 – 72 GHz. Naopak hodnota parametru S_{11} antény v rámci pásma 6 GHz pohybuje nad -10 dB.

V prípade modelu číslo 2 bolo podobne ako pri modeli číslo 1 nastavených niekoľko monitorov na rôznych frekvenciách, v rámci ktorých došlo k výpočtu zisku antény. V i tomto prípade bola zobrazená jednak 3D vyžarovacia charakteristika, ale i vertikálne a horizontálne rezy. Obdobne ako v prípade prvého modelu, pre prehľadnosť boli monitory nastavené na stredy oboch pásiem, charakteristiky z krajných bodov sú k dispozícii v prílohe A. Prvý monitor bol teda nastavený na frekvenciu 2450 MHz, čiže inými slovami na stred frekvenčného pásma. Z 3D vyžarovacej charakteristiky na obrázku 6.26 vyplýva, že v tomto bode anténa dosahuje maximálny zisk 3.37 dBi. I v tomto prípade anténa pôsobí všesmerovo, avšak hlavný smer vyžarovania je prítomný v oblasti nad meandrovitou časťou antény. Oproti modelu číslo 1 teda nedošlo k výrazným zmenám v zisku, ani v tvare vyžarovacej charakteristiky. Druhý monitor bol opäť nastavený na stred frekvenčného pásma, a síce na frekvenciu 5512.5 MHz. V tomto bode z 3D vyžarovacej charakteristiky zobrazenej na obrázku č. 6.27 vyplýva, že zisk antény v jeho maxime dosahuje hodnotu 5.24 dBi. I v tomto prípade oproti modelu číslo 1 nenastala výrazná zmena, charakter vyžarovania zostáva rovnaký, došlo však k veľmi miernemu navýšeniu hodnoty zisku.

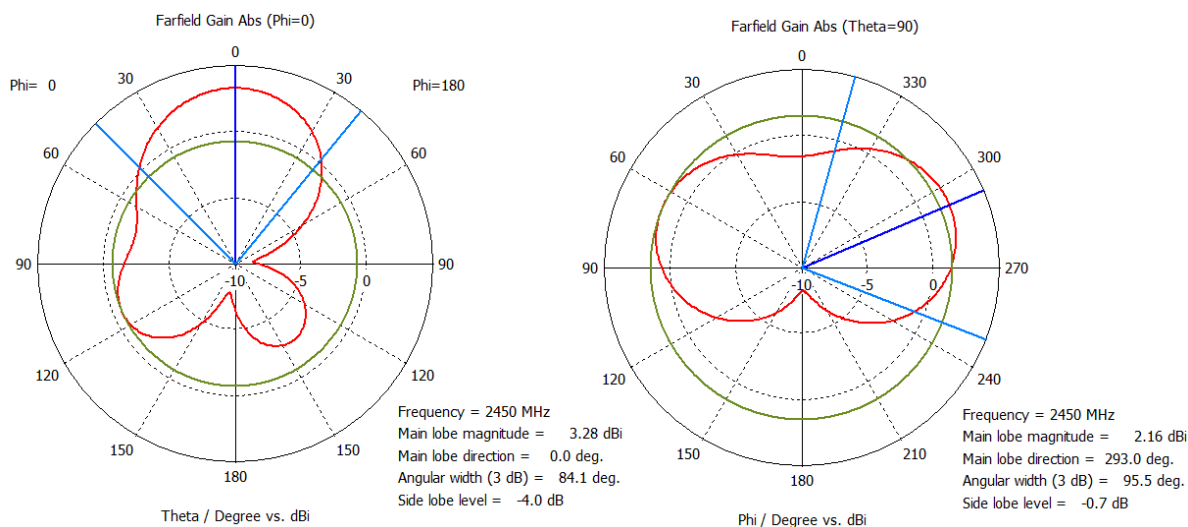


Obr. 6.26: 3D vyžarovací diagram 2450 MHz (model č. 2)



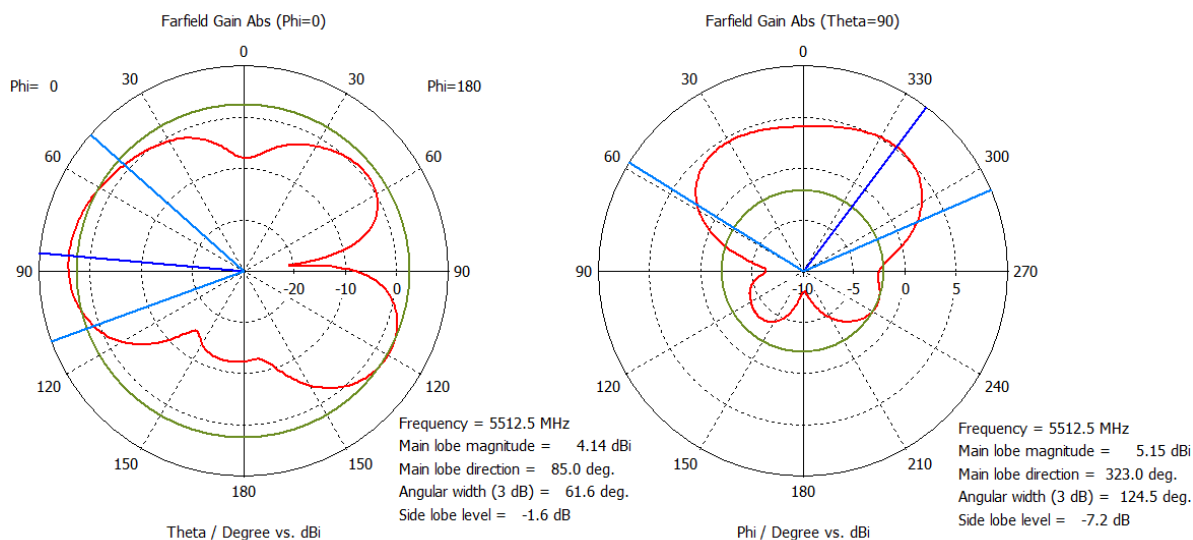
Obr. 6.27: 3D vyžarovací diagram 5512.5 MHz (model č. 2)

Čo sa týka vertikálneho rezu smerovej charakteristiky pre frekvenciu 2450 MHz zobrazeného na obrázku č. 6.28, maximálna hodnota zisku dosahuje 2.16 dBi. Vyžarovací uhol v tomto reze sa pohybuje na hodnote 95.5° . V horizontálnom reze maximálna hodnota zisku nadobúda 3.28 dBi s vyžarovacím uhlom 84.1° .



Obr. 6.28: Smerová charakteristika 2450 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 2)

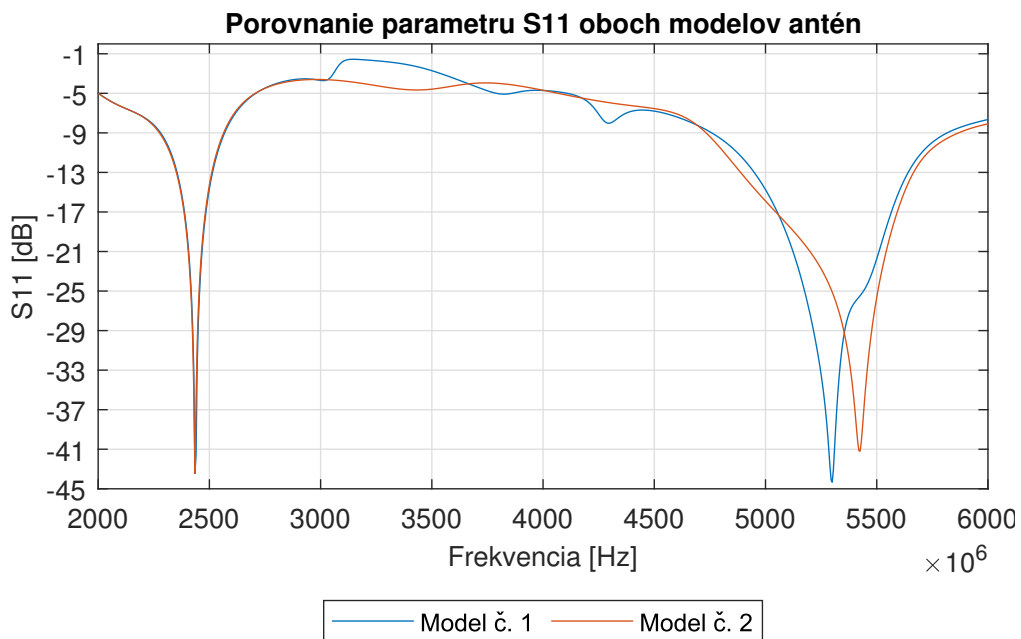
Pre frekvenciu 5512.5 MHz v rámci vertikálneho rezu smerovej charakteristiky zobrazeného na obrázku č. 6.29 sa maximálna hodnota zisku pohybuje na hodnote 5.15 dBi, vyžarovací uhol zase nadobúda hodnotu 124.5°. Pre horizontálny rez sa maximálna hodnota zisku pohybuje na 4.14 dBi s vyžarovacím uhlom 61.6°. Ako v prípade modelu číslo 1, i druhý model antény nadobúda lineárnu polarizáciu.



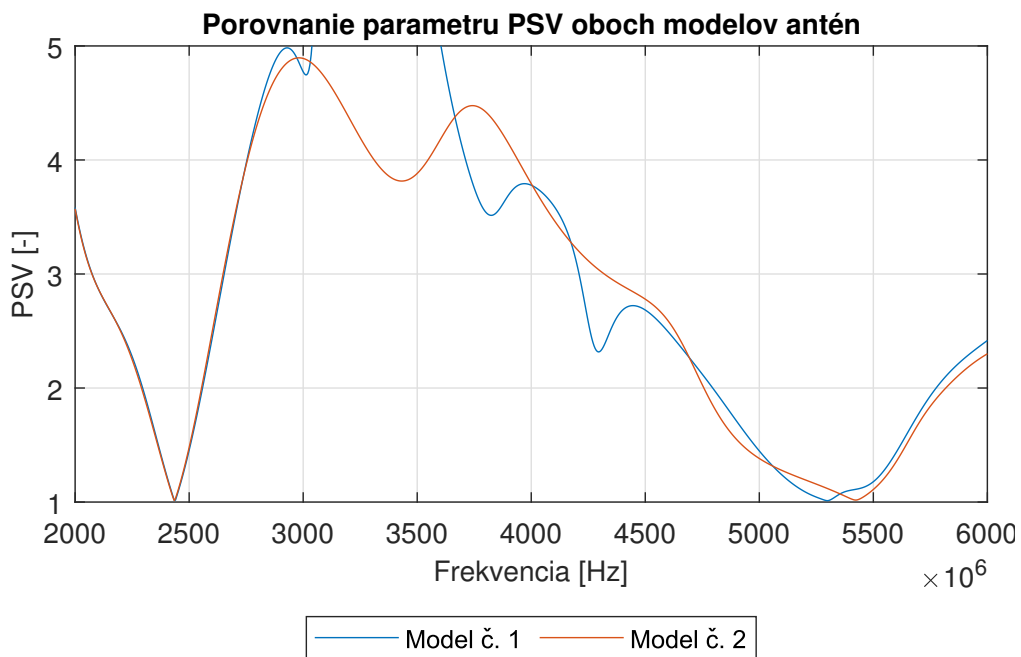
Obr. 6.29: Smerová charakteristika 5512.5 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 2)

Efektivita modelu číslo 2 v rámci pásma 2400 – 2500 MHz dosahuje v minime 87.9 %, oproti modelu číslo 1 teda nastáva mierne zlepšenie, v rámci pásma 5150 – 5875 MHz sa efektivita pohybuje zase na minimálnej hodnote 71.9 %, čo je i v tomto prípade mierne zlepšenie oproti modelu číslo 1.

Pre kompletnosť a názornosť je na nasledujúcich obrázkoch 6.30 a 6.31 ešte na záver znázornené porovnanie parametru S_{11} a parametru PSV oboch modelov antén.



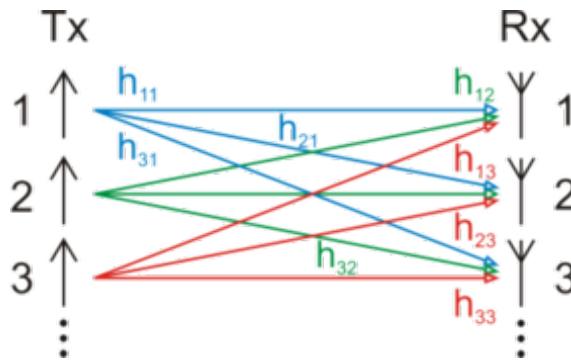
Obr. 6.30: Porovnanie parametru S_{11} oboch modelov antén



Obr. 6.31: Porovnanie parametru PSV oboch modelov antén

6.5 Využitie antény v prevádzke 2x2 MIMO

Multiple-input multiple-output, alebo v skratke MIMO je pojem, s ktorým sa v oblasti rádiovkej komunikácie stretávame čoraz častejšie. Jedná sa o abstraktný matematický model, pre multi-anténne komunikačné systémy, ktorého počiatky spadajú až do roku 1970. V praxi myšlienka MIMO obnáša využitie viacerých antén na strane prijímača, ale i vysielača. Takáto kombinácia antén na oboch stranách využíva viaccestného šírenia signálu, čo má za následok minimalizáciu chýb, zvýšenie prenosovej rýchlosti, alebo zvýšenie kapacity prenosu. MIMO teda zefektívňuje spektrálne využitie bezdrôtových systémov. S MIMO sa stretávame v technológiách ako WiFi, LTE, hojne sa využíva i v sieti piatej generácie.



Obr. 6.32: Znáročenie princípu MIMO

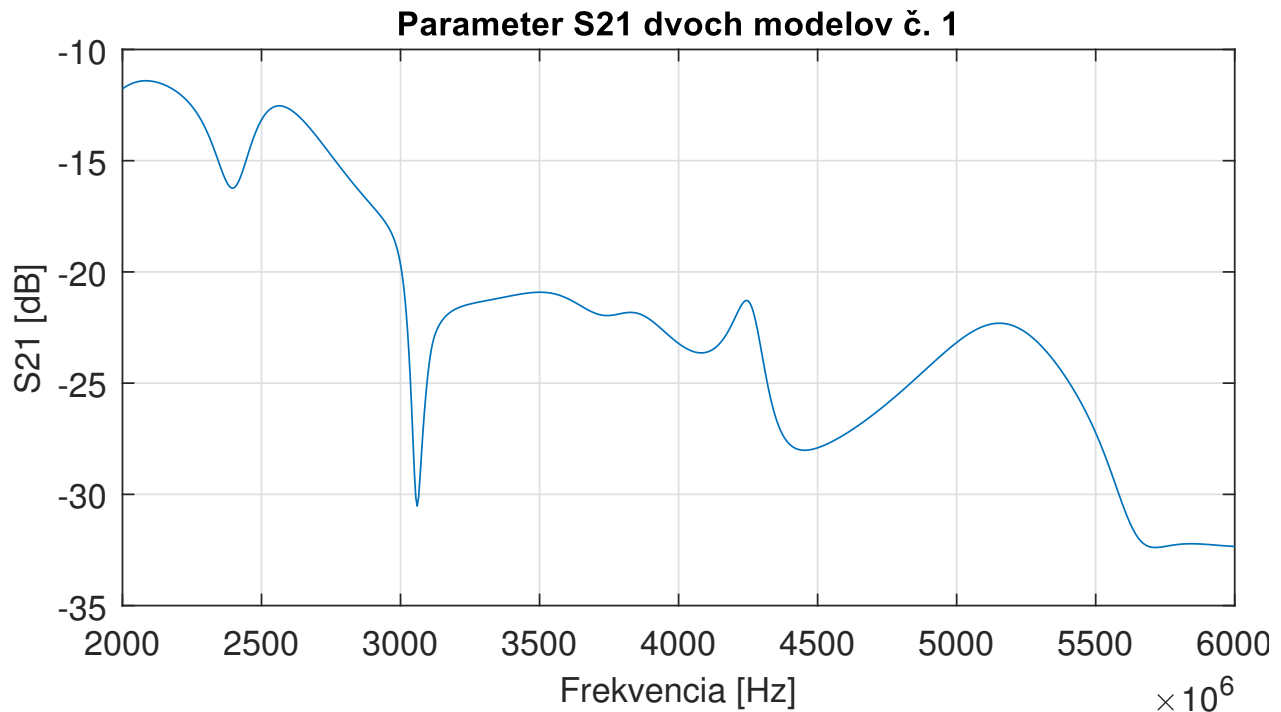
Signál pri samotnom šírení môže byť ovplyvnený rôznymi nežiadúcimi vplyvmi, čo má napr. za následok zníženie prenosovej rýchlosti, či zvýšenie chybovosti. Pri využití myšlienky MIMO, poskytujeme prijímaču viacero verzií toho istého vysielačného signálu. Existuje viacero princípov pre využitie viacero verzií signálu. Prvá možnosť tzv. time diversity je metóda, kedy je správa prenášaná v rôznych časových intervaloch. Druhý spôsob je využitie tzv. frequency diversity, ktorá využíva rôzne frekvencie. Tretí spôsob, a síce space diversity, využíva antény umiestnené v rôznych pozíciách, tak aby bol maximálnym spôsobom využitý jav viaccestného šírenia. Využitím viacerých antén sme zároveň schopní podstatne zvýšiť kapacitu daného kanálu, pri súčasnom dodržaní Shannonovho zákona o kapacite kanálu.

S postupným vývojom a implementáciou technológie MIMO do čoraz viac zariadení, prichádza i MU-MIMO, alebo inak Multi-user MIMO. S touto technológiou sa najviac stretávame pri určitých verziách štandardu 802.11. Technológia MU-MIMO vytvára prostredníctvom systému viacerých antén viac dátových tokov súčasne, čo má za následok výrazne navýšenie priepustnosti.

S príchodom siete piatej generácie došlo i k rozšíreniu tzv. massive MIMO. Massive mimo spadá pod technológiu multi-user MIMO a je primárne určená pre poskytnutie pripojenia mobilným koncovým zariadeniam. Kľúčový koncept tejto myšlienky je vybavenie vysielačnej strany veľkým množstvom antén, ktorých počet môže siahäť až do niekoľkých stoviek, ktoré sú usporiadané do an-

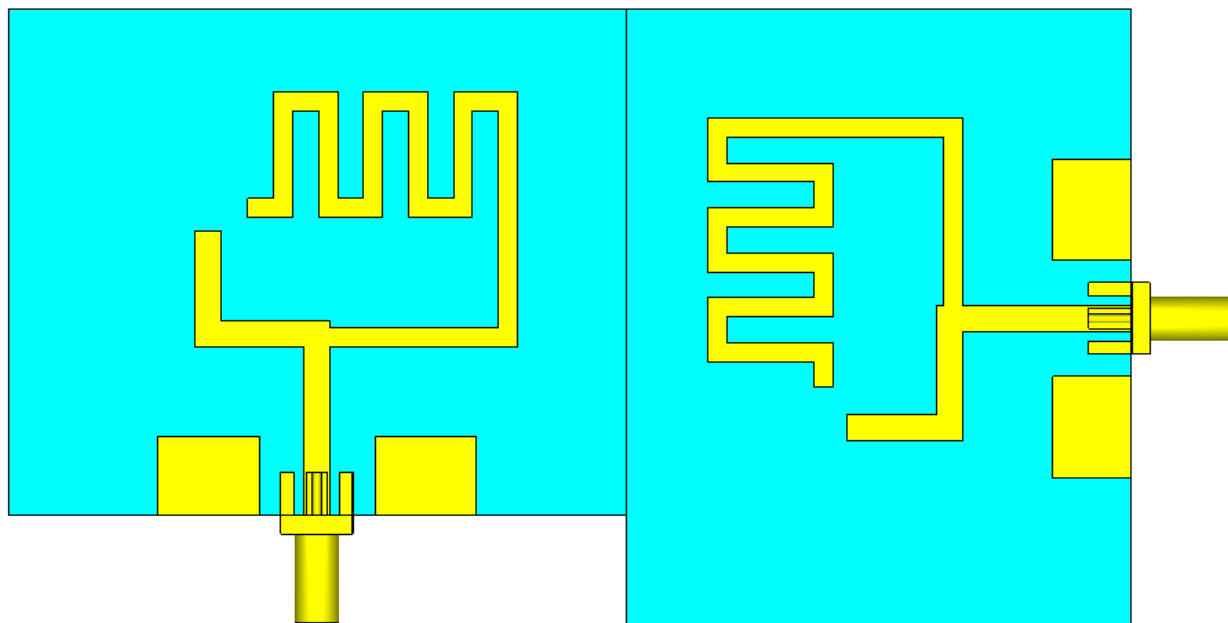
ténneho poľa. Prekrývajúce sa vlny potom spôsobia interferenciu, ktorá je v niektorých oblastiach konštruktívna a v iných deštruktívna. Na základe toho princípu je možné signál smerovať presne na miesta, kde je to potrebné. Metóda, ktorá využíva tieto spomenuté vlastnosti sa nazýva beam-forming.[46][47]

Keďže navrhovaná anténa pracuje v rámci štandardu 802.11, kde určité technológie myšlienku MIMO podporujú, je potrebné overiť, či navrhovaná anténa bude vhodná i pre takéto využitie. Overenie prebehlo v rámci nástroja CST Studio s využitím optimalizovaného finálneho návrhu. Keďže bolo potrebné overiť usporiadanie 2x2 MIMO, bolo potrebné hotový model zduplikovať a otočiť o 90° . Výsledná konfigurácia teda obsahuje 2 antény, ktoré sú usadené vedľa seba, a sú oproti sebe otočené o 90° . Obdobná úprava bola aplikovaná i pre model číslo 2. Aby bolo možné antény spoľahlivo využiť, musí byť ich vzájomná interakcia čo najmenšia. Na posúdenie vhodnosti využitia antén na tento účel využijeme parameter S_{21} , ktorý v jednoduchosti vyjadruje, aká časť energie je prenesená z portu 1 do portu 2. Pre správne fungovanie je potrebné aby táto hodnota bola čo najnižšia, inými slovami aby teda energia prenesená z portu 1 do portu 2 bola čo najnižšia a antény by sa správali navzájom izolovane. Graf parametru S_{21} , resp. S_{12} možno pozorovať na nasledujúcom obrázku č. 6.33.[48]



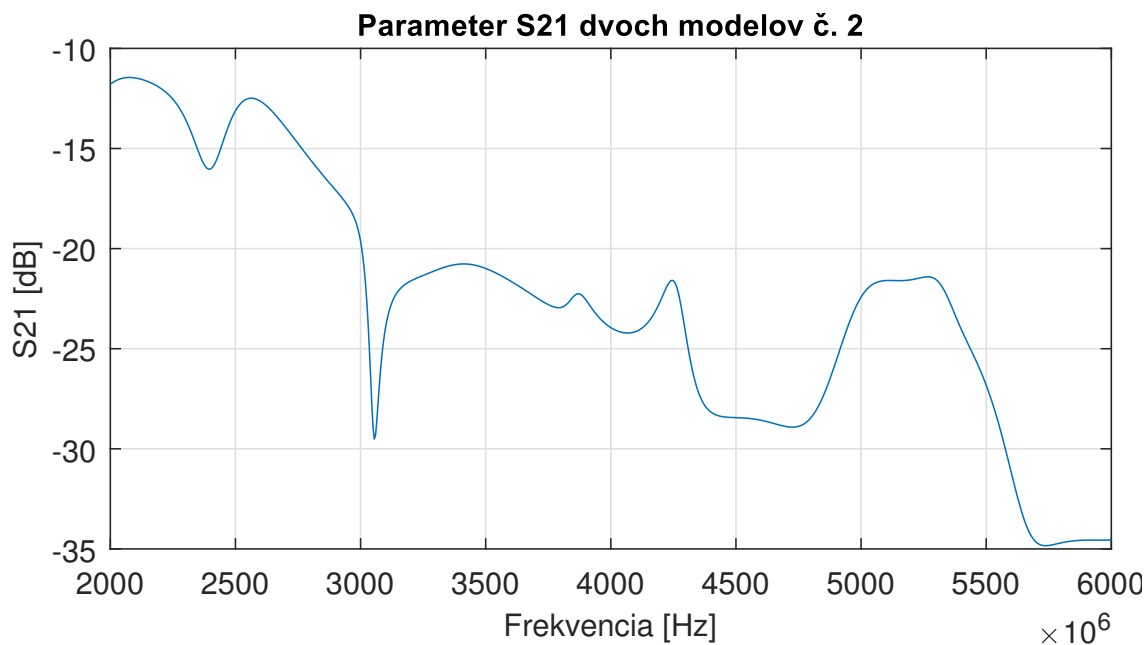
Obr. 6.33: Parameter S_{21} modelov č. 1

Z grafu je na prvý pohľad zrejmé, že hodnota parametru S_{21} dosahuje v celom simulovanom pásme hodnotu menšiu ako -10 dB. V pásme 2.4 GHz a teda v oblasti, kde navrhovaná anténa operuje, nachádzame približne v strede pásma lokálne minimum, kde parameter S_{21} dosahuje hodnotu -16.24 dB. V celom pásme však parameter S_{21} nepresahuje -13.16 dB. Táto hodnota vyjadrená v percentách reprezentuje približne 4 %. Keďže parameter S_{21} reprezentuje aká časť energie je prenesená z portu 1 do portu 2, znamená to teda, že v tomto prípade dochádza k minimálnemu prenosu energie medzi jednotlivými portami. Hodnota parametru S_{21} vo vyšších frekvenciách, približne od 3 GHz výrazne klesá a následne nestúpa nad hodnotu -20 dB. V rámci pásma 5 GHz, v ktorom anténa taktiež operuje, hodnota S_{21} dosahuje v maxime -22.31 dB. Táto hodnota opäť vyjadrená v percentách reprezentuje približne 0.5 %. Znamená to teda, že v rámci pásma 5 GHz dochádza len k minimálnemu prenosu energie medzi portami antén a navrhnutý model číslo 1 je možné využiť i pre konfiguráciu 2x2 MIMO. Usporiadanie antén modelu číslo 1, využitie pri simulácii možno sledovať na nasledujúcom obrázku 6.34.



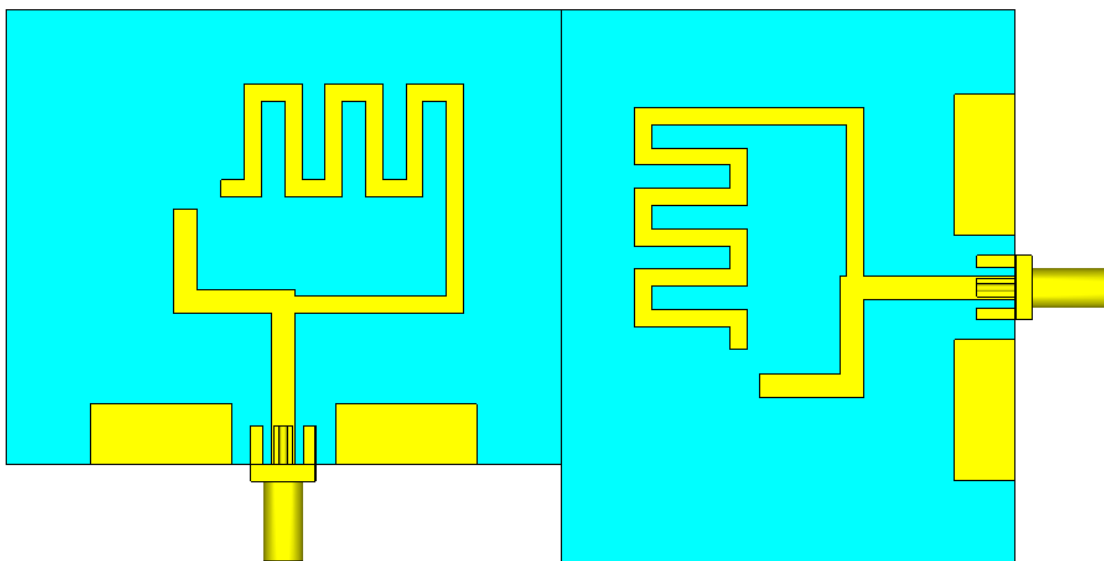
Obr. 6.34: Usporiadanie modelov č. 1 v nástroji CST Studio

Obdobná úprava bola aplikovaná i na model číslo 2. Graf parametru S_{21} modelov číslo 2 možno sledovať na nasledujúcom obrázku č. 6.35.



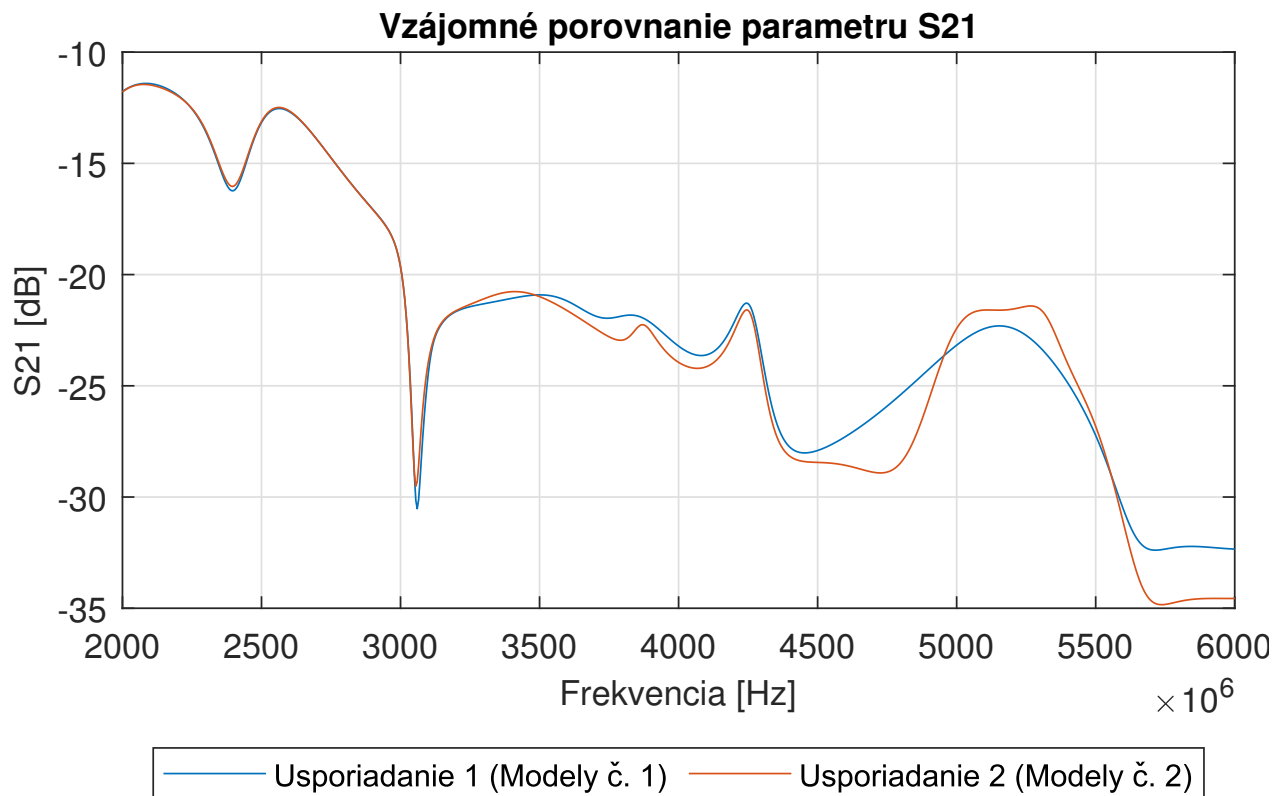
Obr. 6.35: Parameter S_{21} modelov č. 2

Z grafu 6.35 je zrejmé, že oproti prvému prípadu nenastali výrazné zmeny. Priebeh parametru S_{21} , ako i jeho hodnota v rámci pásma 2.4 GHz zostáva nezmenená. Mierna zmena nastala v oblasti 5 GHz, kedy v maxime došlo k miernemu navýšeniu hodnoty S_{21} na -21.41 dB, avšak v oblasti 5.5 GHz oproti prvému prípadu dochádza k strmšiemu poklesu tohto parametru. Usporiadanie antén modelu číslo 2, využité pri simulácii možno sledovať na nasledujúcom obrázku 6.36.



Obr. 6.36: Usporiadanie modelov č. 2 v nástroji CST Studio

Pre názornejšiu ukážku je nasledujúcim grafe 6.37 možno sledovať porovnanie parametrov S_{21} pre prvé i druhé popísané usporiadanie.



Obr. 6.37: Porovnanie parametru S_{21} pre obe usporiadania

Z výsledkov simulácií vyplýva, že parameter S_{21} je pri daných konfiguráciách dostatočne nízky a oba modely je možné využiť i v rámci usporiadania 2x2 MIMO.

Kapitola 7

Praktická realizácia

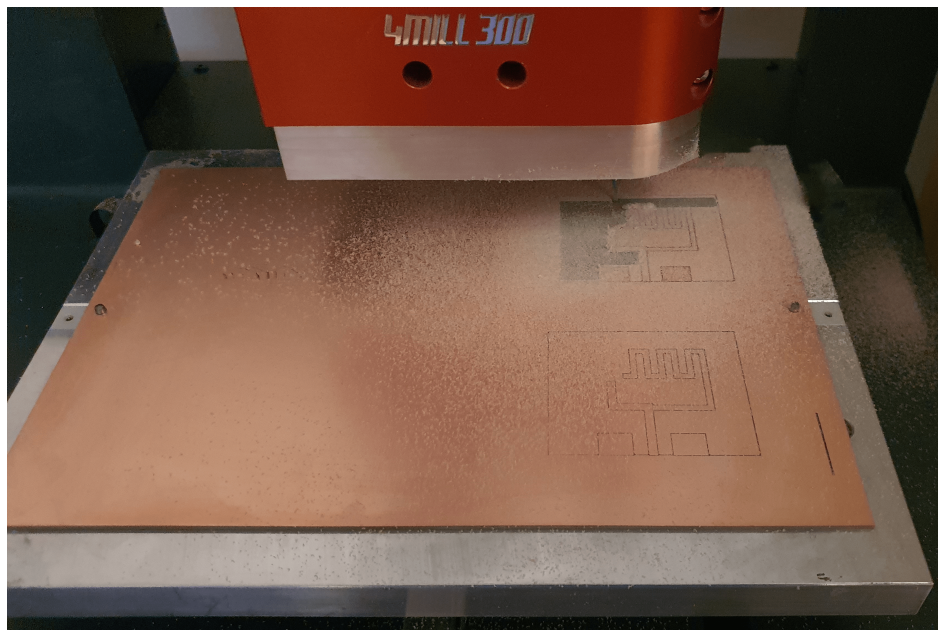
Posledným, a zároveň jedným z najdôležitejších krokov pri návrhu antény je jej samotná výroba. Po úspešnom dokončení optimalizácie v nástroji CST Studio bolo teda možné k výrobe pristúpiť.

7.1 Výroba antény

Ako už bolo v predchádzajúcich kapitolách načrtnuté, anténa bude vyrobená pomocou CNC fréžky. K výrobe oboch modelov bola využitá univerzálna CNC fréžka s označením MIPEC 4MILL300, ktorá je vhodná i pre frézovanie DPS. Fréžka ponúka rozlíšenie až $1.875\text{ }\mu\text{m}$ a s použitím vhodného nástroja umožňuje frézovať vodivé cesty so šírkou 0.1 mm na pracovnej ploche o veľkosti $230\times 210\text{ mm}$. Fréžka je dodávaná s vlastným softvérom TrackMaker, ktorý umožňuje pohodlný import dát vo formáte Gerber a dokáže automaticky vypočítat dráhy frézovania, spolu s určením potrebných nástrojov, navyše je schopný spracovať i dáta pre frézovania na obojstranných DPS.

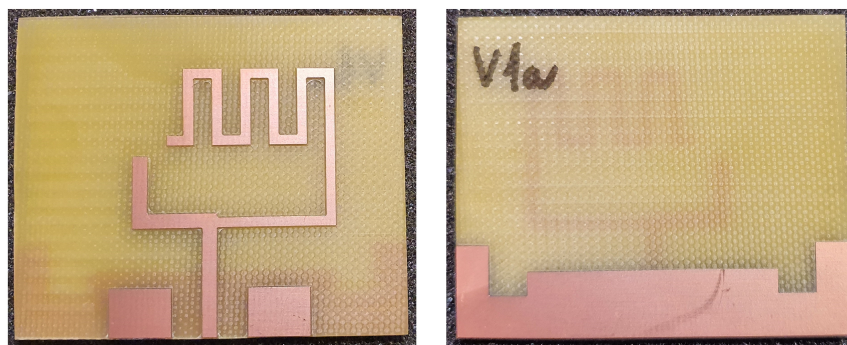
Prvý krok pri výrobe bola teda príprava potrebných dát vo formáte Gerber. Nástroj CST Studio v rámci možnosti exportu modelu ponúka export dát priamo vo formáte Gerber. Výsledný model je však potrebné exportovať samostatne po jednotlivých vrstvách. Po úspešnom exporte teda dostávame 3 Gerber súbory, ktoré reprezentujú vrchnú vrstvu antény, spodnú vrstvu antény a samotnú mechanickú vrstvu, ktorá typicky obsahuje údaje o prípadných vrtoch, či zárezoch v substráte, či substrát samotný.

Po úspešnom exporte bolo možné dáta importovať do softvéru CNC fréžky, kde automaticky došlo k výpočtu trasy a vytvoreniu zoznamu potrebných nástrojov. Po drobných úpravách, nakalibrovaní fréžky a dokončení jednotlivých nastavení bolo možné začať samotné frézovanie. Pri procese frézovania bolo potrebné postupne vymieňať jednotlivé nástroje v závislosti od aktuálne frézovaného miesta. Výhoda využitia CNC fréžky oproti výrobe leplatím spočíva hlavne v rýchlosti a relatívnej jednoduchosti využitia CNC fréžky. Jednotlivé nástroje taktiež disponujú dlhou životnosťou a je možné ich opakovane využívať.



Obr. 7.1: Proces frézovania antén

Využitím CNC fréžky bolo celovo vyrobených 8 kusov antén, konkrétne 4 kusy modelu č. 1 (označené a - d) a 4 kusy modelu č. 2 (označené a - d). Antény boli vyfrézované na DPS o veľkosti 148x210 mm a oddelené od samotného materiálu vhodným nástrojom priamo pri procese frézovania. Oddelenie od DPS však nebolo dokonalé a bolo preto potrebné odstrániť presahujúci substrát i nadbytočnú vrstvu medi v miestach oddelenia použitím jemného brúsneho papiera. Ukážku antény po dokončení tohto procesu možno sledovať na nasledujúcom obrázku č. 7.2.



Obr. 7.2: Ukážka opracovanej antény (model 1a)

Po opracovaní všetkých modelov bolo možné pristúpiť k samotnému napájaniu. Ako už bolo spomenuté, anténa je napájaná PCB koaxiálnym konektorom typu SMA(f), ktorý bolo potrebné napájať takým spôsobom, aby stredový pin konektoru bol v kontakte s mikropásikom na hornej strane antény a nožičky konektoru zase so zemiakovou plochou na strane spodnej. Pre modely 1a - 1c

a 2a - 2c boli využité bežne dostupné konektory nižšej ceny. Pre modely 1d a 2d boli využité konektory vysokej kvality, pochopiteľne s vyššou cenou. Všetky dokončené modely, ktoré sú pripravené na overenie meraním možno sledovať v prílohe B. V tomto bode práce sú všetky modely plnohodnotne vyrobené, osadené konektormi a pripravené na overenie ich vlastností.

7.2 Overenie správnosti návrhu meraním

Po dokončení výroby a všetkých spomínaných úprav bolo možné pristúpiť k overeniu správnosti výroby meraním. Meranie sa uskutočnilo v laboratóriu pomocou dvojportového vektorového analyzátoru ZND značky Rohde&Schwarz, ktorý je schopný pracovať v rozsahu 100 kHz až 8.5 GHz. Analyzátor je možné využiť pre meranie mnohých vlastností, či už antén, alebo iných vysokofrekvenčných štruktúr. Po nakalibrovaní vektorového analyzátoru boli antény k meraciemu prístroju pripojené pomocou káblového predĺženia s vhodnými konektormi. Meranie bolo primárne orientované na meranie parametru S_{11} , ktorý reprezentuje útlm spätného odrazu a parametru PSV, ktorý z neho vychádza. Z nameraných hodnôt vyšlo najavo, že dodatočná optimalizácia, už vyrobených antén nebude potrebná. Po úspešnom dokončení merania bolo ďalej potrebné zmerať zisk vybraných antén. Konkrétny postup a namerané hodnoty sú podrobne popísané v kapitole 7.4.

7.3 Výsledky merania

Ako už bolo v predchádzajúcej kapitole spomenuté, postupne sa podarilo odmerať všetky vyrobené kusy antén. Dokopy teda prebehlo 8 meraní, ktorých výsledky sú pre prehľadnosť usporiadané do viacerých tabuliek. Tabuľky č. 7.1 a č. 7.2 reprezentujú parametre S_{11} a PSV jednotlivých variant modelu č. 1, meraných na vybraných frekvenciách, ktoré zobrazujú jednak krajné body pásma, ale taktiež ich stredy. Tabuľky taktiež pre názornosť obsahujú nasimulované hodnoty meraných parametrov.

Frekv./Verz.	S_{11} [dB]				
	Meranie				Simulácia
	a	b	c	d	$a - b - c - d$
2.400 GHz	-20.88	-18.98	-14.48	-13.11	-19.30
2.450 GHz	-14.63	-26.74	-22.51	-17.30	-28.31
2.500 GHz	-9.44	-12.41	-14.24	-14.15	-14.64
5.150 GHz	-9.50	-7.68	-7.57	-4.85	-22.90
5.512 GHz	-10.85	-9.21	-7.65	-6.57	-20.86
5.875 GHz	-16.28	-13.70	-18.90	-14.07	-8.44

Tabuľka 7.1: Výsledky merania parametru S_{11} modelu č. 1

PSV [-]					
Frekv./Verz.	Meranie				Simulácia
	a	b	c	d	$a - b - c - d$
2.400 GHz	1.20 : 1	1.25 : 1	1.47 : 1	1.57 : 1	1.24 : 1
2.450 GHz	1.46 : 1	1.10 : 1	1.16 : 1	1.31 : 1	1.08 : 1
2.500 GHz	2.01 : 1	1.63 : 1	1.48 : 1	1.49 : 1	1.45 : 1
5.150 GHz	2.00 : 1	2.40 : 1	2.43 : 1	3.67 : 1	1.15 : 1
5.512 GHz	1.80 : 1	2.06 : 1	2.42 : 1	2.77 : 1	1.20 : 1
5.875 GHz	1.36 : 1	1.52 : 1	1.26 : 1	1.49 : 1	2.22 : 1

Tabuľka 7.2: Výsledky merania parametru PSV modelu č. 1

Obdobne sú na tom i tabuľky č. 7.3 a č. 7.4, ktoré reprezentujú namerané hodnoty variantov modelu č. 2. Tabuľky i v tomto prípade obsahujú nasimulované hodnoty meraných parametrov.

S_{11} [dB]					
Frekv./Verz.	Meranie				Simulácia
	a	b	c	d	$a - b - c - d$
2.400 GHz	-21.56	-17.02	-17.37	-20.88	-19.74
2.450 GHz	-14.37	-18.68	-19.78	-14.63	-26.95
2.500 GHz	-9.69	-12.04	-11.88	-9.44	-14.26
5.150 GHz	-7.45	-12.32	-6.05	-9.50	-19.58
5.512 GHz	-8.26	-11.97	-8.20	-10.85	-24.17
5.875 GHz	-7.68	-14.67	-15.63	-16.28	-8.93

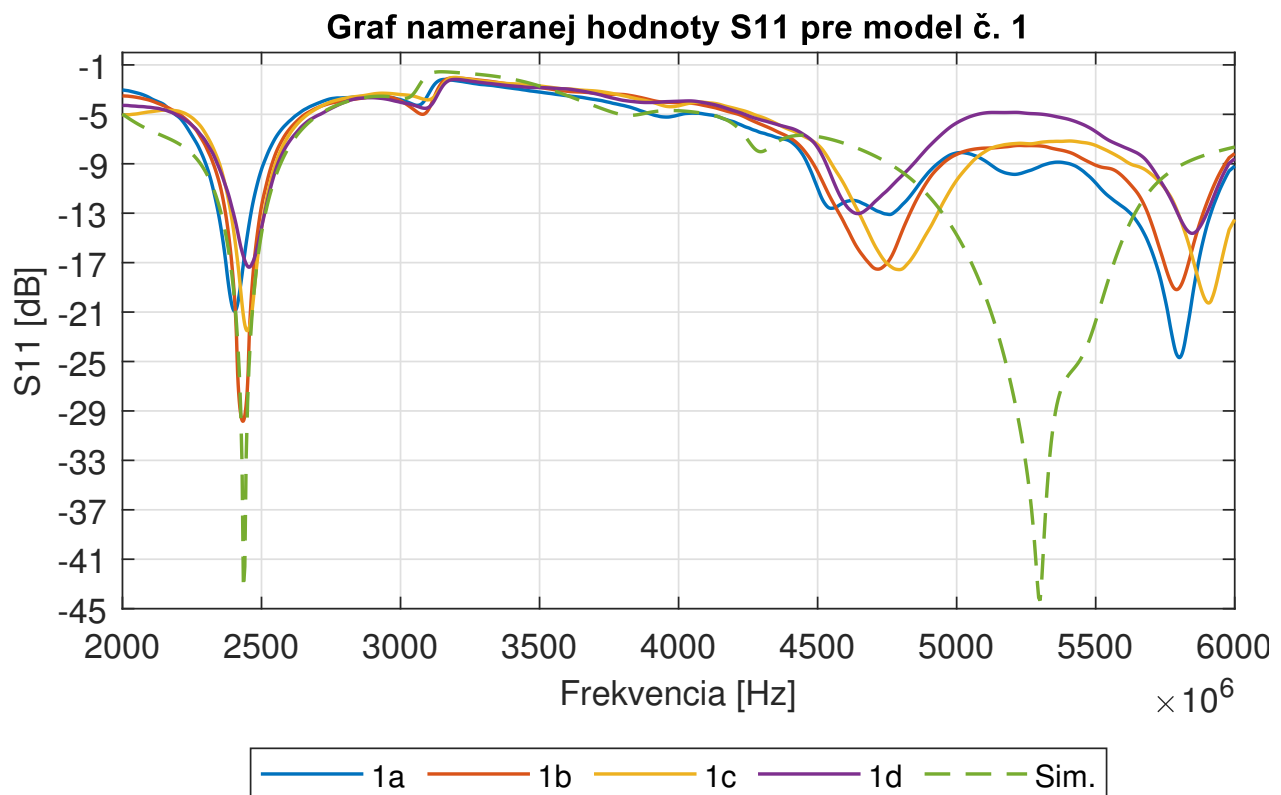
Tabuľka 7.3: Výsledky merania parametru S_{11} modelu č. 2

PSV [-]					
Frekv./Verz.	Meranie				Simulácia
	a	b	c	d	$a - b - c - d$
2.400 GHz	1.18 : 1	1.33 : 1	1.31 : 1	1.20 : 1	1.23 : 1
2.450 GHz	1.47 : 1	1.26 : 1	1.23 : 1	1.45 : 1	1.09 : 1
2.500 GHz	1.98 : 1	1.67 : 1	1.68 : 1	2.01 : 1	1.48 : 1
5.150 GHz	2.47 : 1	1.64 : 1	2.99 : 1	2.00 : 1	1.23 : 1
5.512 GHz	2.26 : 1	1.67 : 1	2.27 : 1	1.80 : 1	1.13 : 1
5.875 GHz	2.39 : 1	1.46 : 1	1.40 : 1	1.35 : 1	2.11 : 1

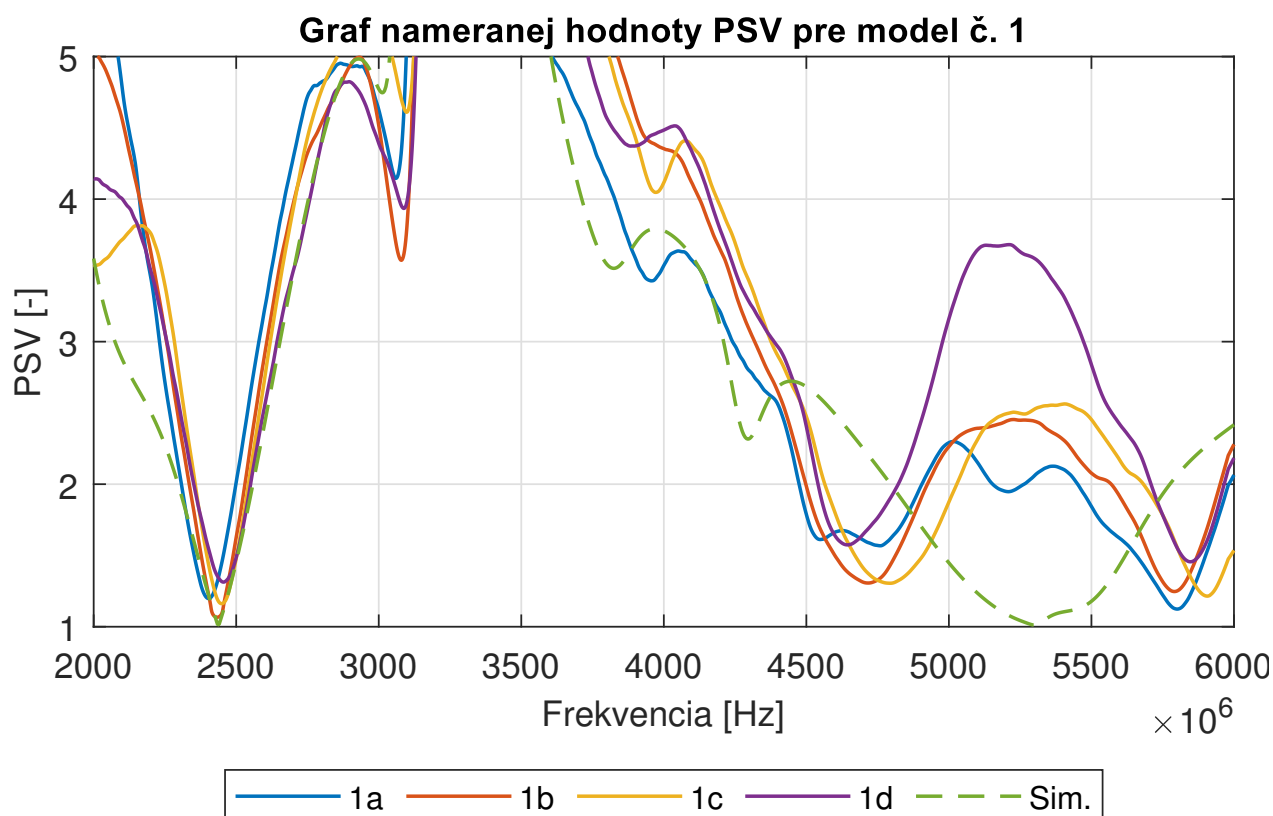
Tabuľka 7.4: Výsledky merania parametru PSV modelu č. 2

Z nameraných hodnôt je na prvý pohľad zrejmé, že tieto hodnoty sa od nasimulovaných odlišujú. Dôvodov, prečo sa vyrobené antény odlišujú od tých nasimulovaných je hneď niekoľko. V prvom rade odlišnosti môžu byť spôsobené samotným pájkovaním a to jednak použitím rozdielného množstva cínu oproti simulácií, ale i celkovým nepresným napájkovaním konektorov, či samotnými konektormi. Za odlišnosťami môže taktiež stáť samotný proces výroby. Keďže všetky modely boli vyrobené pomocou CNC frézy, existuje veľa faktorov, ktoré mohli proces výroby ovplyvniť. Jedným z týchto faktorov môže byť nepatrné zvlnenie DPS, ktoré síce nie je viditeľné voľným okom, avšak pri procese výroby sa prejaví rôznou hĺbkou frézovania na rozdielnych miestach DPS. Ďalšie z faktorov môžu byť i samotné použité nástroje, presnosť samotnej frézy, či jej kalibrácia. Jedným z dôvodov môže byť i mierna rozdielnosť skutočnej hodnoty relatívnej permitivity samotného substrátu oproti hodnotám, ktoré výrobca udáva. Ako už bolo spomenuté, antény po dokončení frézovania museli byť ručne opracované, čo taktiež mohlo mať vplyv na výsledné vlastnosti antén. Netreba zabúdať i na fakt, že technológie štandardu 802.11 sú hojne využívané a pásma 2.4 a 5 GHz sú značne zarušené, čo taktiež mohlo mať vplyv na samotné meranie.

Pre lepšiu prehľadnosť a následne i jednoduchšie porovnanie simulovaných a skutočných hodnôt sú všetky tieto hodnoty vynesené do grafov 7.3 - 7.6. Hodnoty vychádzajúce zo simulácie sú zobrazené čiarkovane, merané hodnoty naopak plnou čiarou.



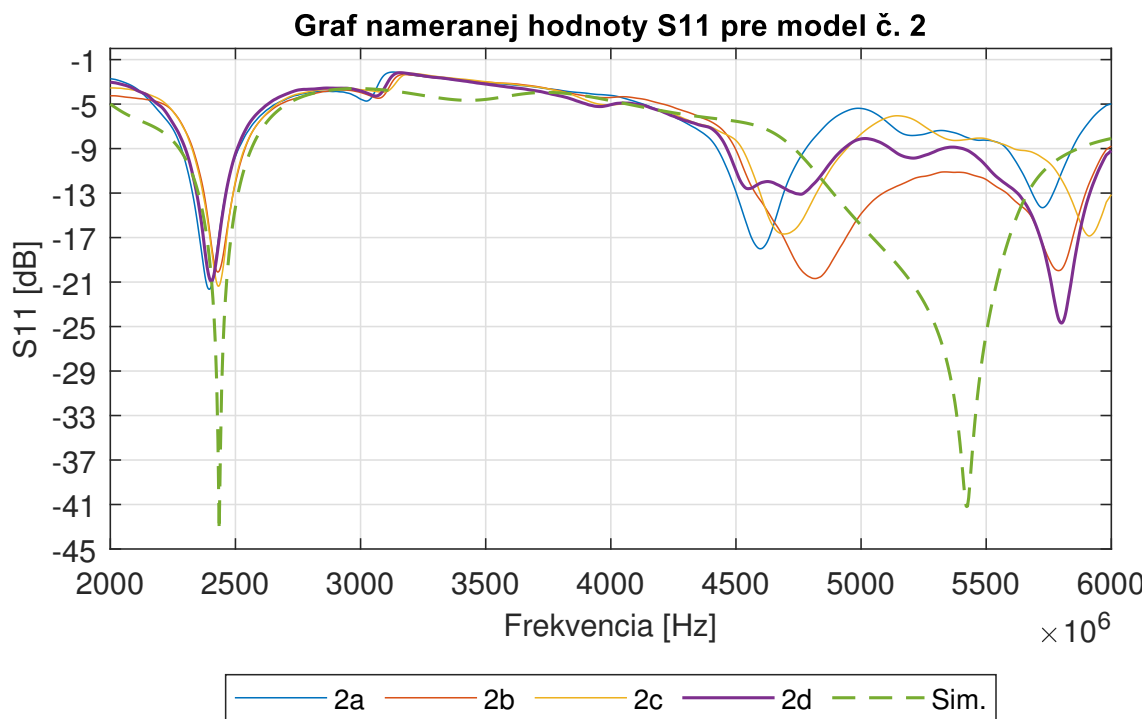
Obr. 7.3: Graf nameranej hodnoty parametru S_{11} pre model č. 1



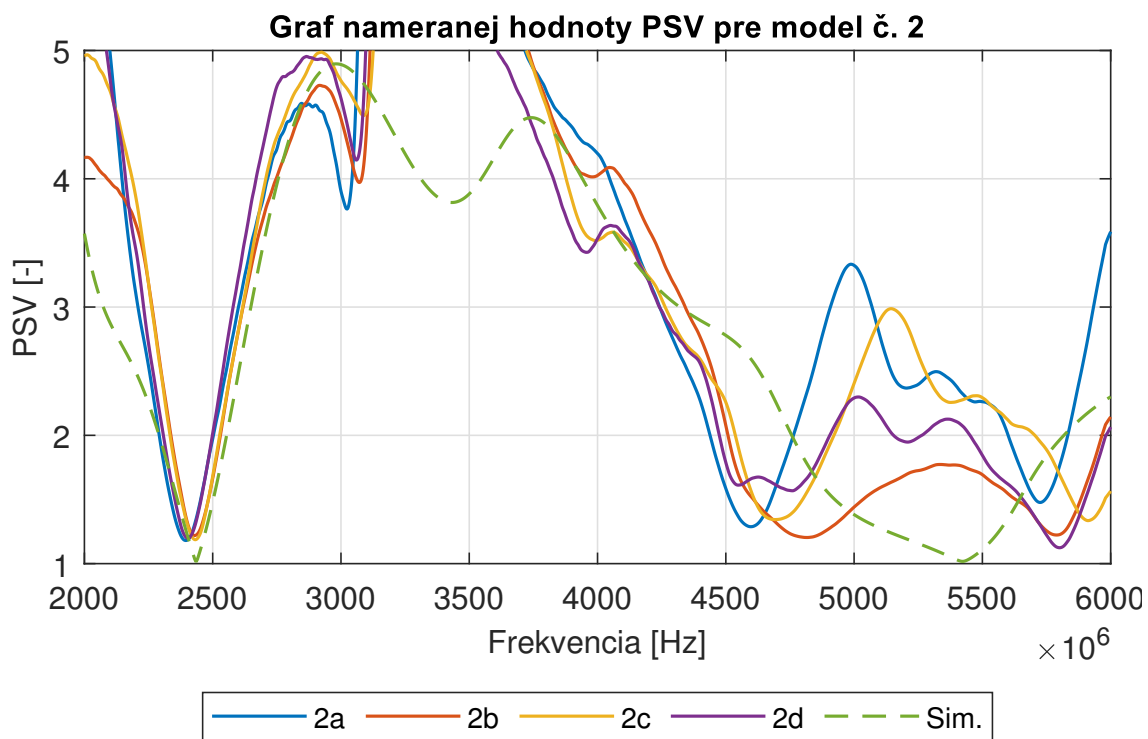
Obr. 7.4: Graf nameranej hodnoty parametru PSV pre model č. 1

Ako už bolo spomenuté, namerané hodnoty sa odlišujú od tých simulovaných. Čo sa týka modelu číslo 1, v pásme 2.4 GHz dochádza k viditeľnému navýšeniu hodnoty minima parametru S_{11} , resp. PSV. Z grafu je taktiež zrejmé, že pri jednotlivých verziách modelu č. 1 dochádza v tomto pásme k miernym posunom pozície minima S_{11} , resp. PSV, avšak i napriek týmto odchýlkam od simulovaných hodnôt, všetky verzie modelu č. 1 v rámci toho pásma dosahujú hodnotu parametru PSV menšiu ako 2.0: 1, čo umožňuje všetky verzie v tomto pásme spoľahlivo využiť.

Výrazná zmena oproti nasimulovaným hodnotám nastáva v rámci pásma 5 GHz. V oblasti pozície simulovaného minima dochádza pri všetkých vyrobených verziách k výraznému navýšeniu parametru S_{11} . Oproti simulácií sa pri meraných verziách vyskytujú i dve lokálne minimá parametru S_{11} a to v oblasti 4750 MHz a 5800 MHz. Vyrobené antény sú teda oproti simulácií schopné pre zjednodušenie pracovať v pásme so stredom v oblasti 4750 MHz so šírkou pásma minimálne 285 MHz a v pásme so stredom v oblasti 5800 MHz so šírkou pásma minimálne 255 MHz. Presné oblasti fungovania antén i so šírkou pásma možno vyčítať z grafu 7.3, resp. 7.4. Výnimku však tvorí model s označením 1a, ktorý je mimo spomínanú oblasť 4750 MHz, schopný pracovať i v celom frekvenčnom pásme, tak ako to bolo definované pri procese simulácie, čo ho robí to všetkých vyrobených verzií modelu číslo 1 najlepším. Presné hodnoty v krajných bodoch požadovaného pásma pre model 1 možno sledovať v tabuľke 7.1, resp. 7.2.



Obr. 7.5: Graf nameranej hodnoty parametru S_{11} pre model č. 2



Obr. 7.6: Graf nameranej hodnoty parametru PSV pre model č. 2

Pri modeli číslo 2, obdobne ako pri čísle 1, v rámci pásma 2.4 GHz dochádza oproti simulácií k navýšeniu minimálnej hodnoty parametru S_{11} , resp. PSV. Avšak rozdiely, či už v pozíciách minima parametru, alebo jeho hodnoty v tomto pásme sú minimálne a všetky verzie, obdobne ako pri modeli číslo 1, sú schopné v rámci tohoto pásma spoľahlivo fungovať.

I v tomto prípade, výrazná zmena oproti simulácií nastáva v pásme 5GHz. Dochádza k obdobnému javu ako pri modeloch číslo 1, a síce dochádza k výraznému navýšeniu hodnoty parametru S_{11} , resp. PSV v oblasti pozície simulovaného minima. Taktiež dochádza k výskytu dvoch lokálnym minim parametru S_{11} v oblasti 4650 MHz a obdobne ako pri modeloch číslo 1 v oblasti 5800 MHz. Oproti simulácií sú teda pre zjednodušenie všetky antény schopné fungovať v pásme so stredom v oblasti 4650 MHz a šírkou pásma minimálne 325 MHz a v pásme so stredom v oblasti 5800 MHz so šírkou pásma minimálne 230 MHz. Presné oblasti fungovania antén opäť možno vyčítať z grafu 7.5, resp. 7.6. Výnimku v tomto prípade tvoria dva modely s označením 2b a 2d. Model 2d je schopný operovať v celom frekvenčnom pásme, tak ako to bolo definované pri procese simulácie. Avšak najlepšie zo všetkých modelov na tom je model s označením 2b, ktorý je schopný fungovať nie len v pásme definovanom pri procese simulácie, ale i v novo vyskytujúcom sa pásme so stredom v oblasti 4650 MHz. Anténa je tak v tejto oblasti (4507 – 5968 MHz) schopná fungovať v pásme so šírkou až 1461 MHz, čo robí tento konkrétny model najlepší zo všetkých vyrobených.

7.4 Meranie zisku vybraných antén

Po dokončení merania parametrov S_{11} a PSV bolo možné pristúpiť k poslednému kroku, a síce k meraniu hodnoty zisku antén. Pri meraní bola využitá tzv. metóda dvoch antén, ktorá je založená na využití známej referenčnej antény a znalosti presnej vzdialenosti medzi anténou meranou a anténou referenčnou. Referenčná, resp. známa anténa je pripojená k zdroji VF signálu, neznáma, resp. meraná anténa je pripojená k vektorovému analyzátoru. Obe antény sú postavené proti sebe a nachádzajú sa v rovnakej výške. Ideálne prostredie pre meranie tohto typu, pre dosiahnutie čo najpresnejších a najspoľahlivejších výsledkov je miesto, kde nedochádza k žiadnym odrazom, tzv. bezodrazová komora. Nakoľko meranie zisku prebiehalo v laboratóriu, ktoré je vybavené iba bezodrazovou stenou, antény boli umiestnené práve pred túto stenu. Ukážku meracieho stanoviska možno pozorovať v prílohe D. Ako referenčná bola využitá anténa s označením DRH10, ktorá bola pripojená na zdroj signálu Rohde&Schwarz SMW200A, ktorý môže disponovať frekvenčným rozsahom 100 kHz až 44 GHz. Meraná anténa bola zase pripojená k spektrálnemu analyzátoru Rohde&Schwarz FSH8, ktorý je schopný fungovať v rozsahu 9 kHz až 8 GHz. Celkovo prebehlo meranie zisku vždy na troch frekvenciách a to na 2.45 GHz, 5.15 GHz a 5.8 GHz. Celý princíp merania vychádza z Friisovej rádiokomunikačnej rovnice

$$P_{Rx} = G_{Tx} + P_{Tx} + G_{Rx} + L_0 \text{ [dBm]}, \quad (7.1)$$

kde P_{Rx} je prijatý výkon, G_{Tx} je zisk vysielacej (referenčnej) antény, P_{Tx} je vysielací výkon, G_{Rx} je zisk prijímacej (neznámej) antény a L_0 sú straty šírením voľným priestorom, ktoré vychádzajú zo vzťahu

$$L_0 = 20 \cdot \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \text{ [dB]}, \quad (7.2)$$

kde λ je vlnová dĺžka a d je vzdialenosť prekonaná šírením elektromagnetickej vlny.

Keďže všetky hodnoty, okrem hodnoty zisku prijímacej, resp. meranej antény zo vzťahu 7.1 sú známe, jednoduchou úpravou teda dostávame vzťah pre výpočet zisku meranej antény

$$G_{Rx} = P_{Rx} - P_{Tx} - G_{Tx} - L_0 \text{ [dBi]}. \quad (7.3)$$

Vzhľadom na to, že vzdialenosť medzi anténami d je 1.865 m, vysielací výkon P_{Tx} bol nastavený na 0 dBm, zisk referenčnej antény dosahuje 10.81 dBi @2.45 GHz, 13.08 dBi @5.15 GHz, 13.47 dBi @5.80 GHz a úroveň prijímaného výkonu je meraná pomocou spektrálneho analyzátoru, tak sme schopní dosadiť do vzťahu 7.3 a určiť tak zisk meranej verzie antény, pri danej frekvencii. Keďže nie všetky vyrobené antény je možné spoľahlivo využiť v rámci požadovaného frekvenčného pásma, meranie zisku prebehlo len pri vybraných anténach. Nasledujúca tabuľka 7.5 zobrazuje namerané hodnoty zisku vybraných antén, na konkrétnych frekvenciách.

Zisk [dBi]						
Frekv./Verz.	Meranie				Simulácia	
	1a	1b	2b	2d	Model 1	Model 2
2.45 GHz	-3.09	-2.99	-2.69	-1.39	3.41	3.37
5.15 GHz	-1.40	-3.61	2.29	2.88	5.13	4.84
5.80 GHz	3.34	3.64	4.32	4.54	5.92	6.15

Tabuľka 7.5: Namerané hodnoty zisku vybraných antén

Ako je z tabuľky 7.5 na prvý pohľad zrejmé, namerané hodnoty zisku sa značne odlišujú od tých simulovaných. Hodnoty zisku sú pri všetkých meraných modeloch oproti simulácií nižšie. Najlepšie pri meraní dopadol model s označením 2d, ktorý zároveň dopadol najlepšie i pri predchádzajúcom meraní. Meranie zisku však bolo značne limitované vybavením laboratória. Hodnota zisku bola taktiež meraná v jednom bode pod konkrétnym uhlom, ktorý sa nemusel presne zhodovať s uhlom, pod ktorým by sme v rámci kompletnej vyžarovacej charakteristiky našli maximálnu hodnotu zisku. Kompletná vyžarovacia charakteristika by teda v tomto prípade poskytla komplexnejší pohľad na zisk antén a pravdepodobne by mala za následok i zmenu maximálnej hodnoty zisku.

Z výsledkov merania je zrejmé, že vyrobené antény sa od tých nasimulovaných v určitej miere odlišujú. Miera odlišnosti samozrejme závisí od konkrétneho kusu. Výsledky merania však ukazujú, že všetky vyrobené kusy sú schopné operovať v pásme 2.4 GHz. Odlišnosti oproti nasimulovaných hodnotám sa začínajú prejavovať až v pásme 5 GHz, kedy namiesto jedného globálneho minima parametru S_{11} , sú prítomné 2. Dôvody, prečo tieto odlišnosti nastali sú popísané v predchádzajúcich riadkoch. Avšak i napriek týmto rozdielom sú antény s označením "1a", "2b", "2d" schopné prevádzky v rámci požadovaných pásiem. Meranie zisku, ako to už bolo spomenuté, prebehlo len pri štyroch vybraných najlepších kusoch. Z merania celkovo vyplýva, že anténa s najlepšími vlastnosťami z pomedzi všetkých vyrobených nesie označenie "2d".

Kapitola 8

Záver

Úvod práce si dáva za cieľ v stručnosti popísať najrozšírenejšie technológie bezdrôtových PAN/WAN sietí, ktoré operujú v rámci pásiem 2.4 a 5 GHz, prípadne využívajú i pásma okolité. Keďže jednotlivé technológie sú definované rozdielnymi štandardmi a každá technológia je špecifická, nie len svojim účelom, ale i svojou rádiovou časťou, preto je pri popise kladený dôraz na frekvenčné pásma, počty kanálov, prípadne na maximálne povolené výkony.

Ďalšia kapitola, obdobne ako ta predchádzajúca je venovaná všeobecnému popisu, tentokrát však štandardu 802.11. Keďže navrhovaná anténa je primárne určená pre tento štandard, popis je opäť zameraný primárne na frekvenčné pásma, počty kanálov, použité modulácie, maximálne povolené výkony a iné. V rámci popisu je vždy venovaná krátka časť každému štandardu od dnes už zastaralého 802.11 až po do budúcnosti plánovaný 802.11be.

Nasledujúca časť práce je primárne zameraná na všeobecnú problematiku planárnych antén. V teoretickej rovine je táto časť venovaná popisu výhod, prípadne nevýhod tohto typu antén, časť je venovaná konkrétnym planárnym anténam, ale taktiež ich stručnému popisu. V rámci úvodu je rovnako venovaný čas konštrukcii, ale i napájaniu, či princípu vyžarovania takýchto antén. Samozrejme nesmie chýbať základný popis viacpásmových antén, či spôsobov ako viacpásmovosti dosiahnuť. Táto časť práce teda slúži ako akýsi teoretický úvod do problematiky planárnych antén, od ktorého je možné sa odraziť v ďalších kapitolách.

Nasleduje kapitola, ktorá je venovaná dielektrickým substrátom. Keďže pri návrhu antény je výber vhodného substrátu veľmi dôležitý, kapitola sa preto venuje teoretickému popisu dielektrík, spomenuté sú ich najdôležitejšie vlastnosti, ale i vplyvy samotného dielektrika na, či už mechanické, alebo elektrické vlastnosti antény. V rámci tejto kapitoly je venovaná i časť komerčne dostupným substrátom, ktoré sú v stručnosti popísané vzhľadom na ich vlastnosti a vhodnosť využitia pre konkrétne aplikácie. K záveru kapitoly taktiež dôjde k výberu substrátu, ktorý je využitý pre návrh antény v tejto práci i s odôvodnením tejto voľby.

Ďalšia kapitola je zameraná na hlavnú náplň diplomovej práce, a síce na samotný návrh planárnej antény. Úvod tejto kapitoly je venovaný stručnému popisu nástroja CST Studio, definovaniu

pásiem, v ktorých anténa bude pracovať a určeníu minimálnych požiadaviek na budúci návrh. Časť je taktiež venovaná výberu vhodného napájania a odvodeniu základných parametrov pre návrh antény. Nasleduje prvotná simulácia antény a následná optimalizácia, ktorá je v rámci kapitoly podrobne popísaná. Konečný výsledok kapitoly sú dva plne optimalizované modely, ktorých vlastnosti sú v rámci kapitoly podrobne rozobraté a popísané, a ktoré sú schopné pracovať v rámci definovaných pásiem. Záver kapitoly je zameraný na stručný popis technológie MIMO a overeniu možnosti navrhovanej antény fungovať i v rámci takéhoto využitia. Overenie prebehlo v nástroji CST Studio, kde pomocou simulácie bolo potrebné overiť v akej miere sa dve navrhované antény ovplyvňujú a posúdiť tak možnosť využitia v rámci konfigurácie 2x2 MIMO.

Posledná kapitola je zameraná na popis samotnej výroby antén. Výroba bola realizovaná pomocou CNC frézky. Popis procesu výroby je taktiež súčasťou tejto kapitoly. Po úspešnej výrobe je venovaná časť posledným úpravám a napájkovaniu samotného konektoru. Nasleduje časť venovaná meraniu, následnému podrobnému vyhodnoteniu a porovnaniu s nasimulovanými hodnotami. Ďalšia časť sa venuje meraniu zisku, ktorá je taktiež ukončená vyhodnotením a porovnaním nameraných hodnôt oproti simulácií.

Všetky podstatné grafy a fotodokumentácia z procesu merania sú súčasťou prílohy.

Literatura

1. MIKÉSKA, Zdeněk. *Specifikace rádiové části systému Bluetooth* [online]. Brno [cit. 2021-04-09]. Dostupné z : <http://www.elektrorevue.cz/clanky/04003/index.htm>.
2. *Specification of the Bluetooth System: Specification Volume 1* [online] [cit. 2021-04-09]. Dostupné z : https://people.inf.ethz.ch/hvogt/proj/btmp3/Datasheets/Bluetooth_11_Specifications_Book.pdf.
3. *Zigbee FAQ* [online] [cit. 2021-04-09]. Dostupné z : <https://zigbeealliance.org/zigbee-faq/>.
4. *ZigBee Specification* [online]. 2015 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z : <https://zigbeealliance.org/wp-content/uploads/2019/11/docs-05-3474-21-0csg-zigbee-specification.pdf>.
5. *Ultra-Wideband (UWB)* [online] [cit. 2021-04-09]. Dostupné z : <https://bleesk.com/uwb.html>.
6. *Z-Wave Tutorial* [online] [cit. 2021-04-09]. Dostupné z : <https://iotpoint.wordpress.com/z-wave-tutorial/>.
7. *NB-IoT explained: A complete guide to Narrowband-IoT* [online] [cit. 2021-04-13]. Dostupné z : <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-guide/lpwan/nb-iot-narrowband-iot/>.
8. KANJ, Matthieu. *A Tutorial on NB-IoT Physical Layer Design* [online] [cit. 2021-04-12]. Dostupné z : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02952155/document>.
9. *LoRaWAN* [online] [cit. 2021-04-12]. Dostupné z : https://loro-alliance.org/resource_hub/lorawan-104-specification-package/.
10. ROMAN ŠEBESTA, Libor Michalek a. *Rádiové sítě II pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO: Skripta* [online]. 2016 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z : https://lms.vsb.cz/pluginfile.php/990441/mod_resource/content/5/RS2_skripta_20161114.pdf.
11. *5G - Frame Structure* [online] [cit. 2021-04-09]. Dostupné z : https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_FrameStructure_Candidate.html.

12. *5G NR Terminologies* [online] [cit. 2021-04-09]. Dostupné z : <http://www.techplayon.com/understanding-basic-5g-nr-terminologies-subcarrier-spacing-frame-and-subframe-slot-and-ofdm-symbols/>.
13. *What is 6G?* [Online] [cit. 2021-04-09]. Dostupné z : <http://www.miwv.com/what-is-6g/>.
14. *What is 6G?* [Online] [cit. 2021-04-09]. Dostupné z : <https://www.pcmag.com/news/what-is-6g>.
15. *IEEE 802.11b* [online] [cit. 2021-03-18]. Dostupné z : <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/wifi-ieee-802-11/802-11b.php>.
16. *Wi-Fi: Overview of the 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements* [online]. Beaverton [cit. 2021-03-18]. Dostupné z : https://public.cnrood.com/public/docs/WiFi_Physical_Layer_and_Transm_Meas.pdf.
17. *IEEE 802.11a* [online] [cit. 2021-03-18]. Dostupné z : <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/wifi-ieee-802-11/802-11a.php>.
18. *IEEE 802.11g Wi-Fi* [online] [cit. 2021-03-19]. Dostupné z : <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/wifi-ieee-802-11/802-11g.php>.
19. *IEEE 802.11n WLAN Standard* [online] [cit. 2021-03-18]. Dostupné z : <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/wifi-ieee-802-11/802-11n.php>.
20. *IEEE 802.11ac Gigabit Wi-Fi* [online] [cit. 2021-03-18]. Dostupné z : <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/wifi-ieee-802-11/802-11ac.php>.
21. *WiGig: IEEE 802.11ad 60GHz Microwave Wi-Fi* [online] [cit. 2021-03-19]. Dostupné z : <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/wifi-ieee-802-11/802-11ad-wigig-gigabit-microwave.php>.
22. *IEEE 802.11ax Wi-Fi 6* [online] [cit. 2021-03-19]. Dostupné z : <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/wifi-ieee-802-11/802-11ax.php>.
23. *Seznamte se s šestou generací Wi-Fi!* [Online] [cit. 2021-03-19]. Dostupné z : <https://www.tp-link.com/cz/wifi6/>.
24. *802.11ay wireless technology: Next-gen 60GHz WiFi* [online] [cit. 2021-03-19]. Dostupné z : <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/wireless-lan/ieee802-11ay/>.
25. *IEEE 802.11be* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-03-19]. Dostupné z : https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11be.
26. BALANIS, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design. 3rd ed.* Hoboken: John Wiley a Sons, 2005. ISBN 9780471667827.
27. GARG, Ramesh. *Microstrip antenna design handbook*. Boston: Artech House, 2001. ISBN 0-89006-513-6.

28. KUMAR, Girish. *Broadband Microstrip Antennas*. Boston: Artech House, 2003. ISBN 1-58053-244-6.
29. *Multimediální učebnice: Elektromagnetické vlny, Mikrovlnná technika* [online]. Brno [cit. 2021-04-09]. Dostupné z : <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=4>.
30. *Mikropásikové antény* [online] [cit. 2021-04-09]. Dostupné z : https://data.kemt.feit.tuke.sk/EVaA_Elektromagneticke_vlny_a_anteny/_materialy/Prednasky/Pr11/Pr11_Mikropasikove%20anteny.pdf.
31. PANDEY, Anil. *Practical Microstrip and Printed Antenna Design*. Norwood: Artech House, 2019. ISBN 978-1-63081-668-1.
32. KARKHUR, Dhananjay. *Review of Techniques to Design Multiband Microstrip Patch Antennas* [online] [cit. 2021-04-13]. Dostupné z : <https://www.ijltet.org/journal/145942422025.pdf>.
33. GOYAL, Gaurav; SHARMA, Sudhir Kumar; IQBAL, Shahid; SHARMA, Nitesh. *Multiband- ing of microstrip patch antenna by double J - slot method* [online] [cit. 2021-04-12]. Dostupné z : <https://media.neliti.com/media/publications/265797-multibanding-of-microstrip-patch-antenna-6152986f.pdf>.
34. GUHA, Debatosh. *MICROSTRIP AND PRINTED ANTENNAS*. Chichester: John Wiley a Sons Ltd., 2011. ISBN 9780470681923.
35. BANCROFT, Randy. *Microstrip and Printed Antenna Design*. 3. vyd. Croydon: The Institution of Engineering a Technology, 2019. ISBN 978-1-78561-855-0.
36. JAMES, J. R. *Handbook of MICROSTRIP ANTENNAS*. 1. vyd. London: Peter Peregrinus Ltd., 1989. ISBN 0-86341-150-9.
37. *Elektrické vlastnosti izolantov a dielektrik* [online] [cit. 2021-04-09]. Dostupné z : <http://web.tuke.sk/fei-kte/slovak/subjects/ZIM/Kapitola%20-%20-%20Elektricke%20vlastnosti%20izolantov%20a%20dielektrik.pdf>.
38. *Dielektrikum* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2021-04-13]. Dostupné z : <https://cs.wikipedia.org/wiki/Dielektrikum>.
39. *ELEKTROSTATICKÉ POLE V DIELEKTRIKU* [online] [cit. 2021-04-13]. Dostupné z : http://www.st.fmph.uniba.sk/~markos3/prednasky/04_kap04.pdf.
40. *Technical characteristics of the laminates* [online] [cit. 2021-04-09]. Dostupné z : https://www.vyroba-dps.cz/fotky18789/fotov/_ps_93laminaty.pdf.
41. *DuPont™ Pyralux® AP: Technical Information* [online] [cit. 2021-04-09].
42. *RO4000® Series High Frequency Circuit Materials: Data Sheet* [online] [cit. 2021-04-09]. Dostupné z : https://www.mirrorsemi.com/pdf/Rogers_RO4003C_Data_Sheet.pdf.

43. *Astra® MT77: Data Sheet* [online] [cit. 2021-04-09]. Dostupné z : http://www.pragoboard.com/download/astra_mt77.pdf.
44. *RT/duroid® 5870 /5880: Data Sheet* [online] [cit. 2021-04-09]. Dostupné z : <https://rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-connectivity-solutions/english/data-sheets/rt-duroid-5870---5880-data-sheet.pdf>.
45. *CST STUDIO SUITE: ELECTROMAGNETIC FIELD SIMULATION SOFTWARE* [online] [cit. 2021-04-13]. Dostupné z : <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>.
46. *MIMO: multiple input, multiple output* [online] [cit. 2021-04-13]. Dostupné z : <https://searchmobilecomputing.techtarget.com/definition/MIMO>.
47. *What is MIMO Wireless Technology: Multiple Input Multiple Output technology* [online] [cit. 2021-04-13]. Dostupné z : <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/mimo/what-is-mimo-multiple-input-multiple-output-wireless-technology.php>.
48. TU, Duong Thi Thanh. *Design and Implementation of Dual-Band MIMO Antenna* [online] [cit. 2021-04-13]. Dostupné z : <http://ijeti.imeti.org/download/V7-no1-48-60.pdf>.

Obsah elektronickej prílohy

1. Návrh antény

(a) Model-1

(b) Model-2

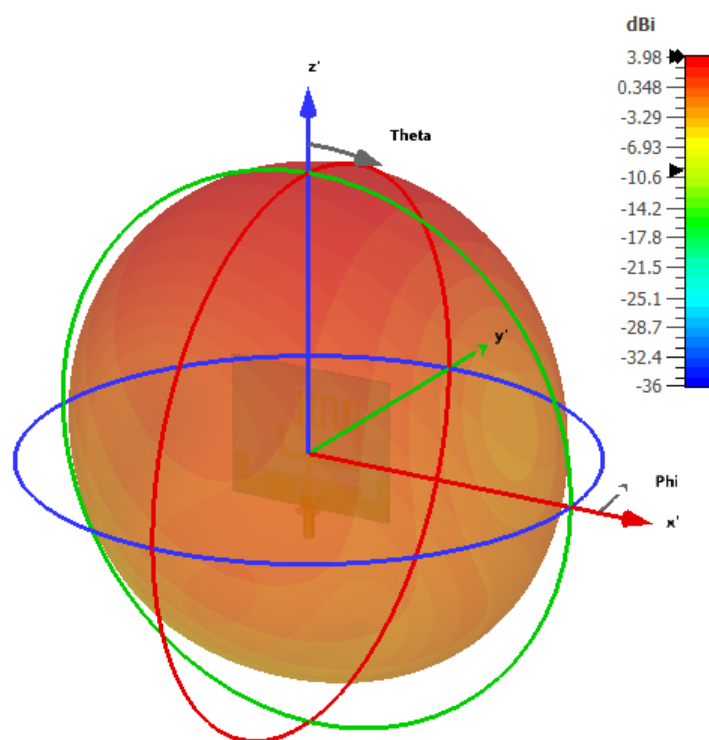
2. Overenie usporiadania 2x2 MIMO

(a) MIMO-Model-1

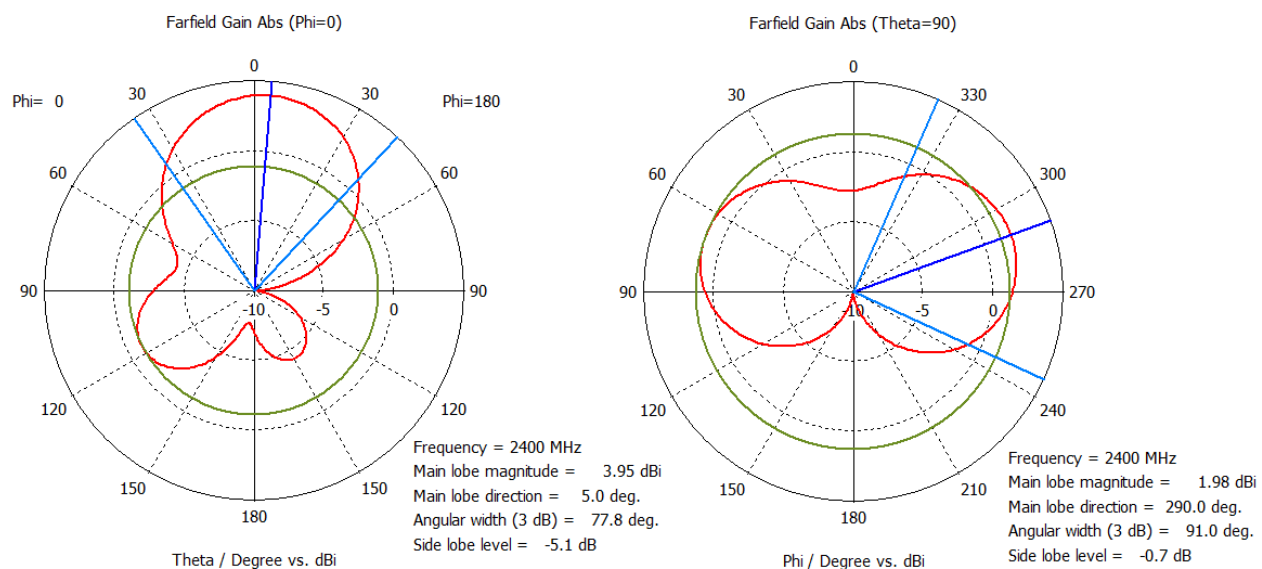
(b) MIMO-Model-2

Dodatok A

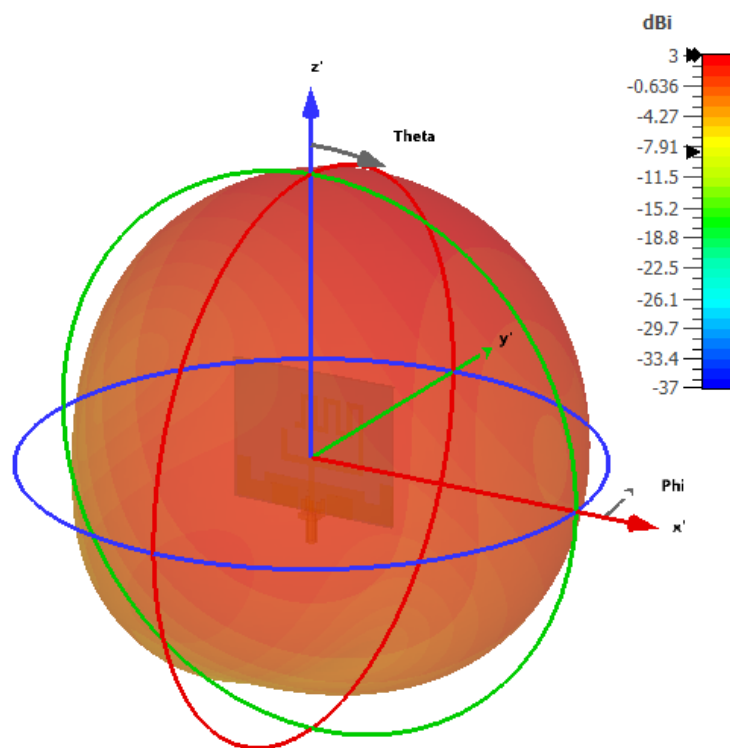
Vyžarovacie charakteristiky



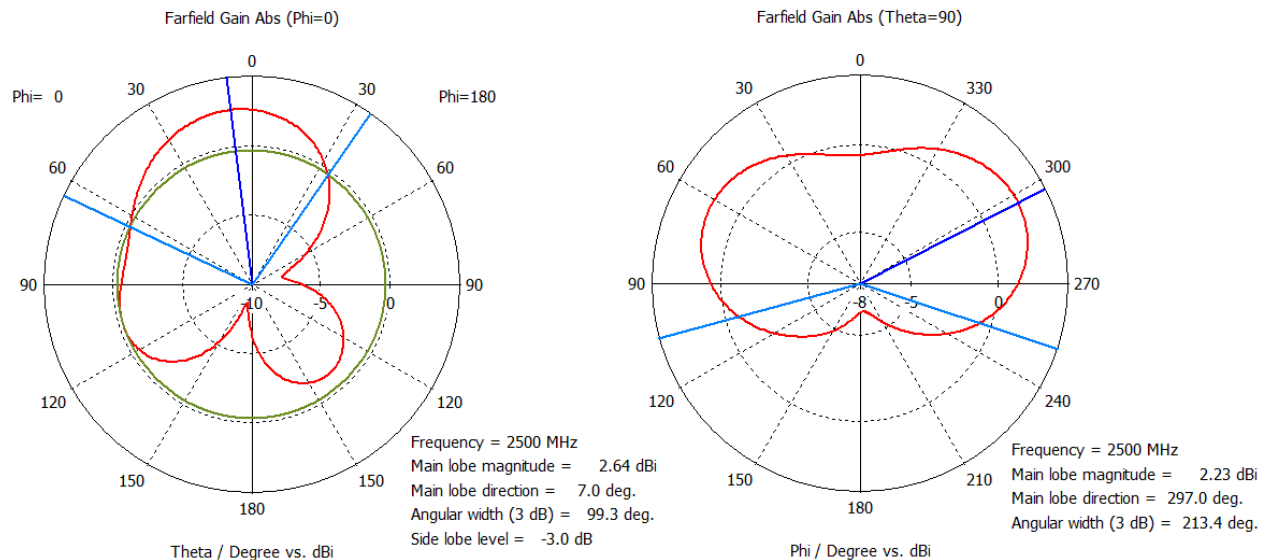
Obr. A.1: 3D vyžarovací diagram 2400 MHz (model č. 1)



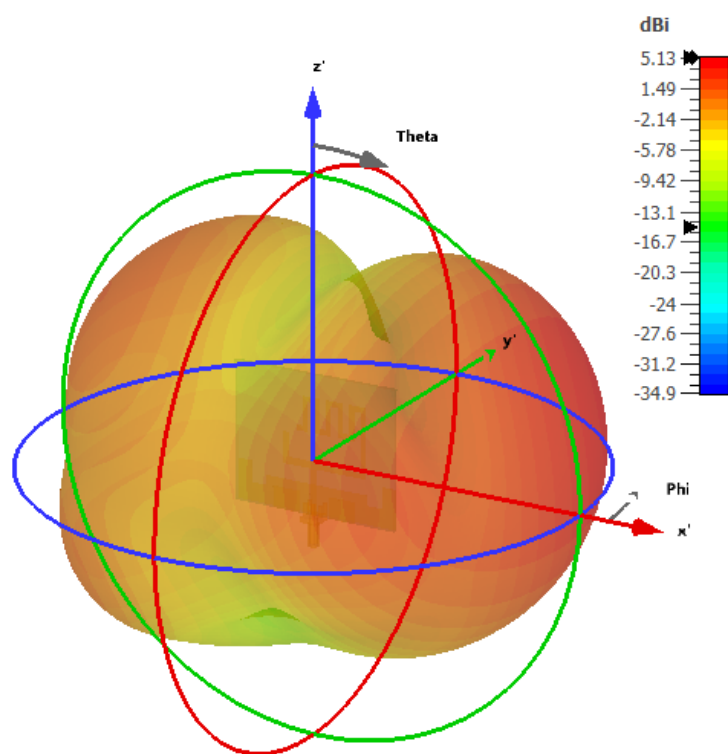
Obr. A.2: Smerová charakteristika 2400 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 1)



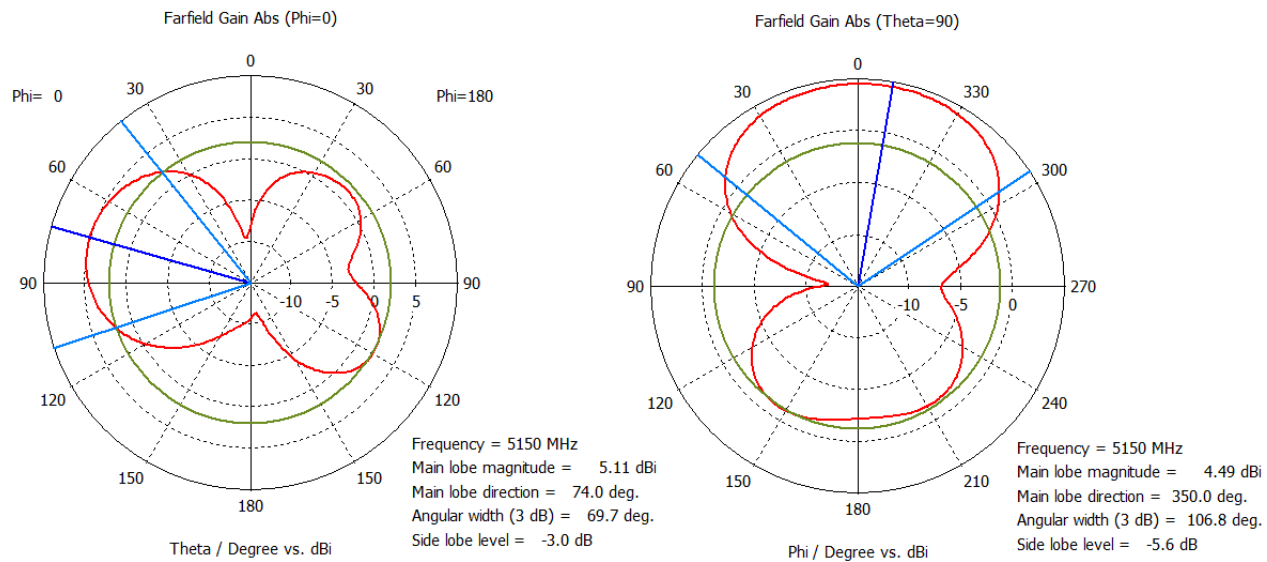
Obr. A.3: 3D vyžarovací diagram 2500 MHz (model č. 1)



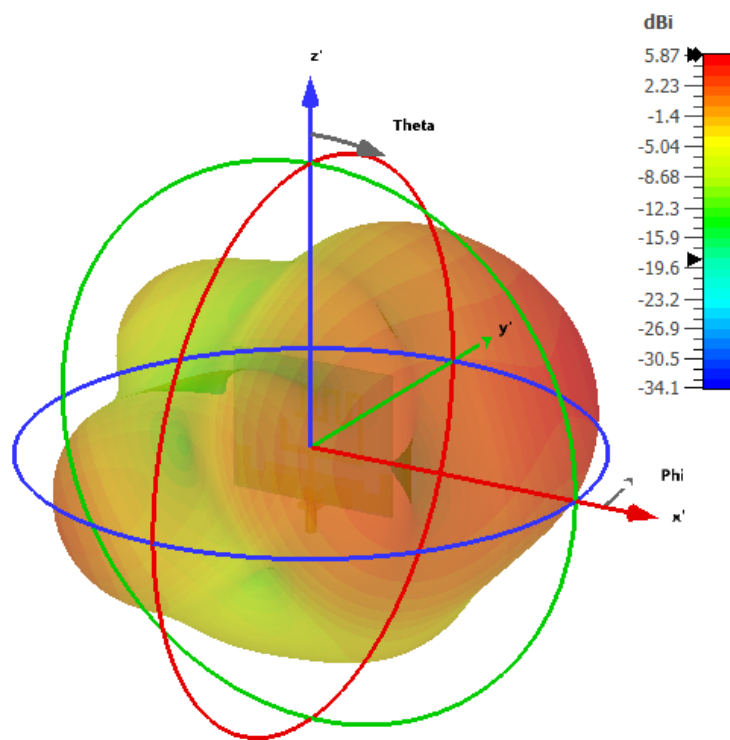
Obr. A.4: Smerová charakteristika 2500 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 1)



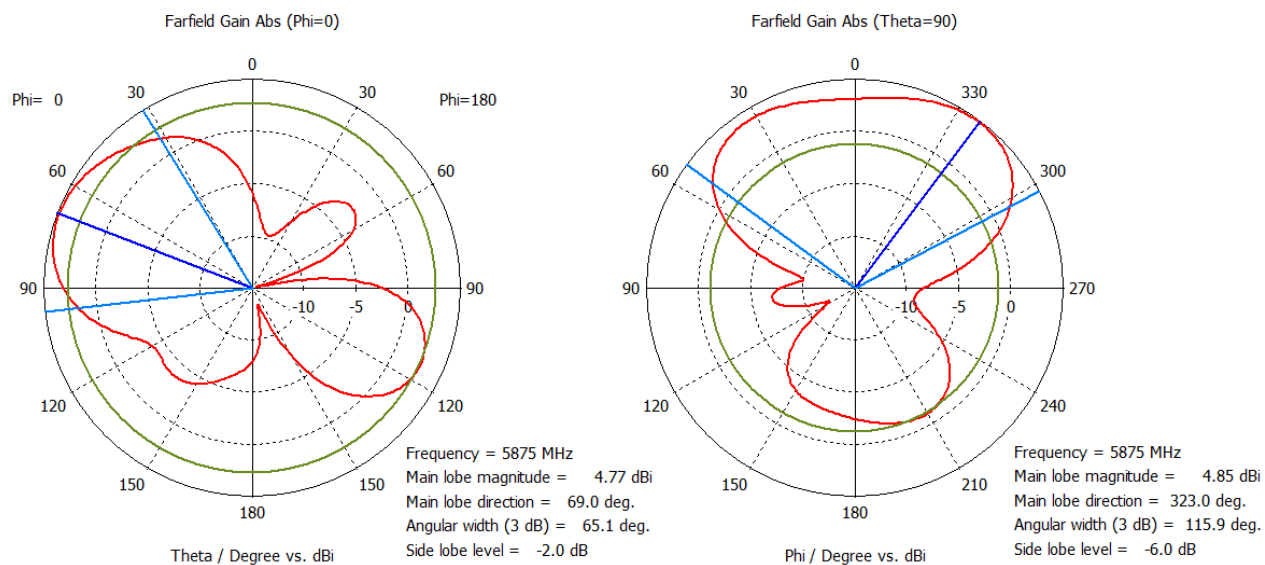
Obr. A.5: 3D vyžarovací diagram 5150 MHz (model č. 1)



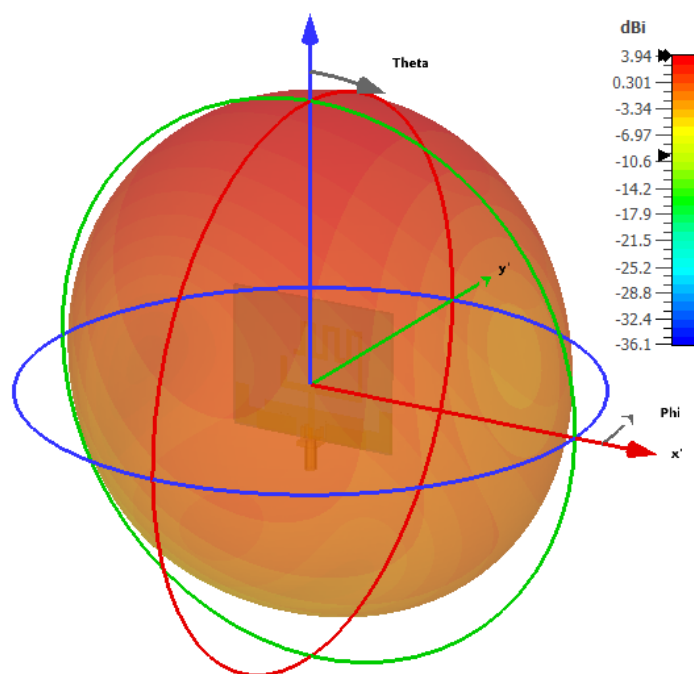
Obr. A.6: Smerová charakteristika 5150 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 1)



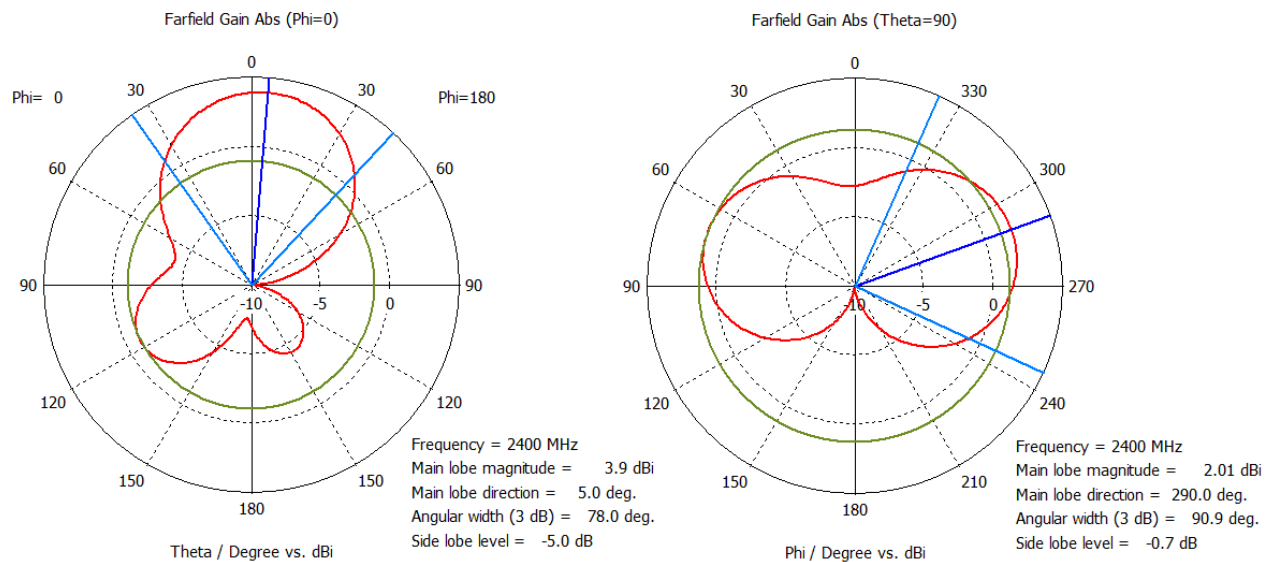
Obr. A.7: 3D vyžarovací diagram 5875 MHz (model č. 1)



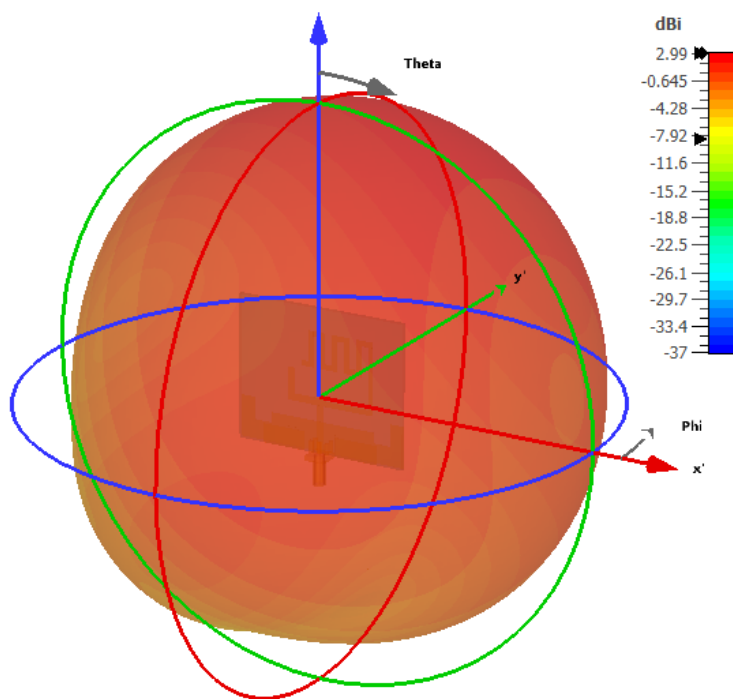
Obr. A.8: Smerová charakteristika 5875 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 1)



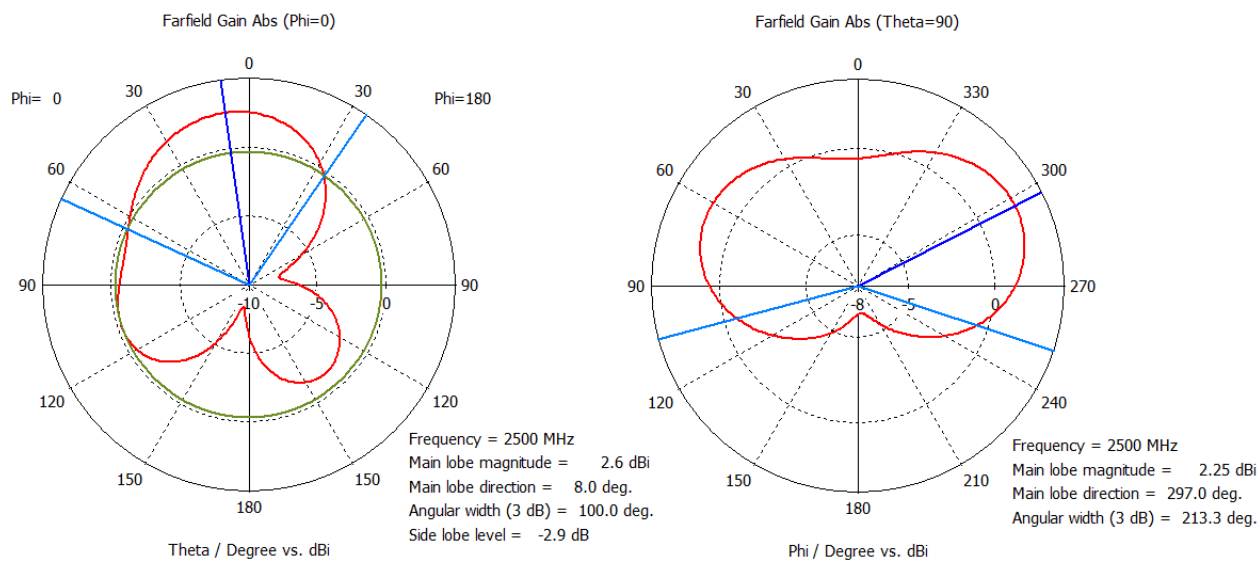
Obr. A.9: 3D vyžarovací diagram 2400 MHz (model č. 2)



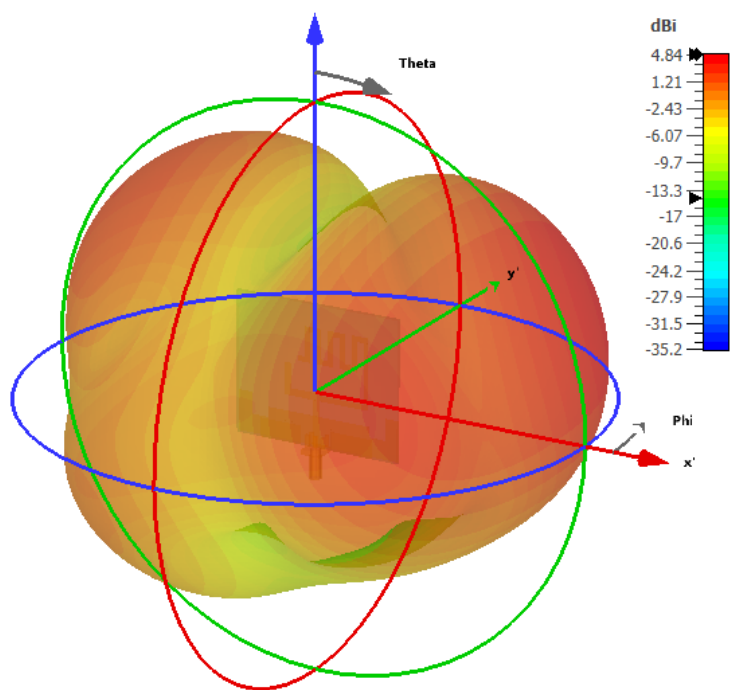
Obr. A.10: Smerová charakteristika 2400 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 2)



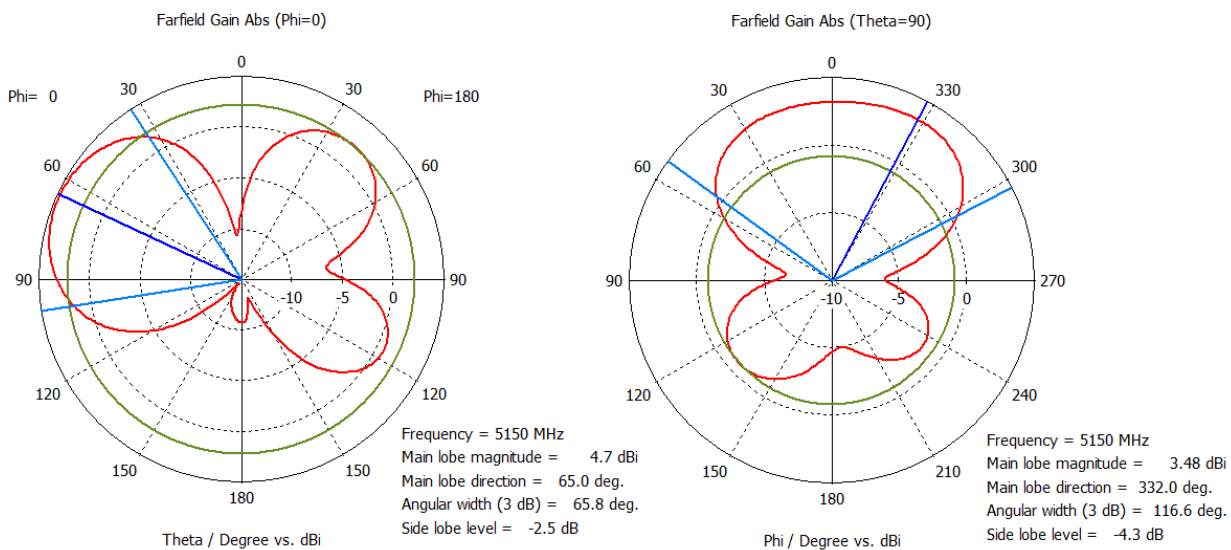
Obr. A.11: 3D vyžarovací diagram 2500 MHz (model č. 2)



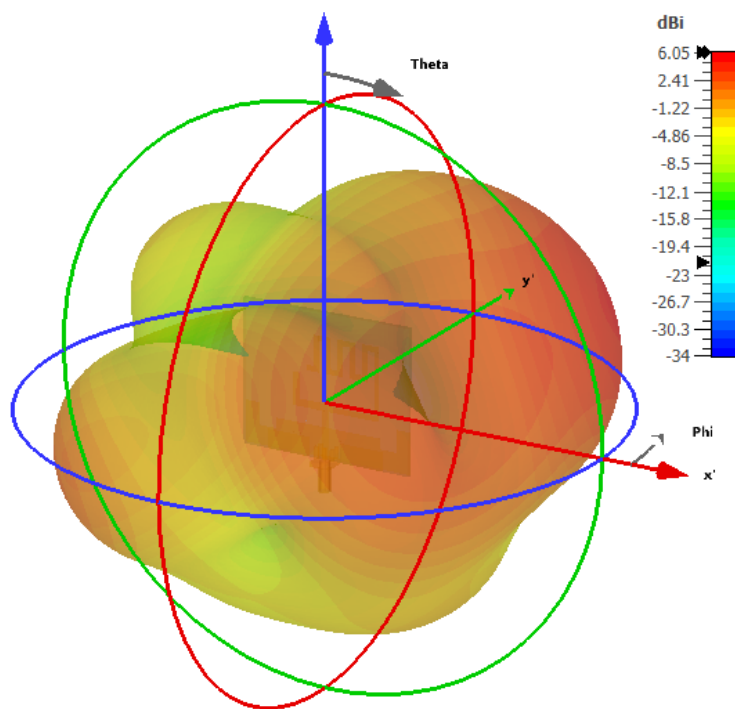
Obr. A.12: Smerová charakteristika 2500 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 2)



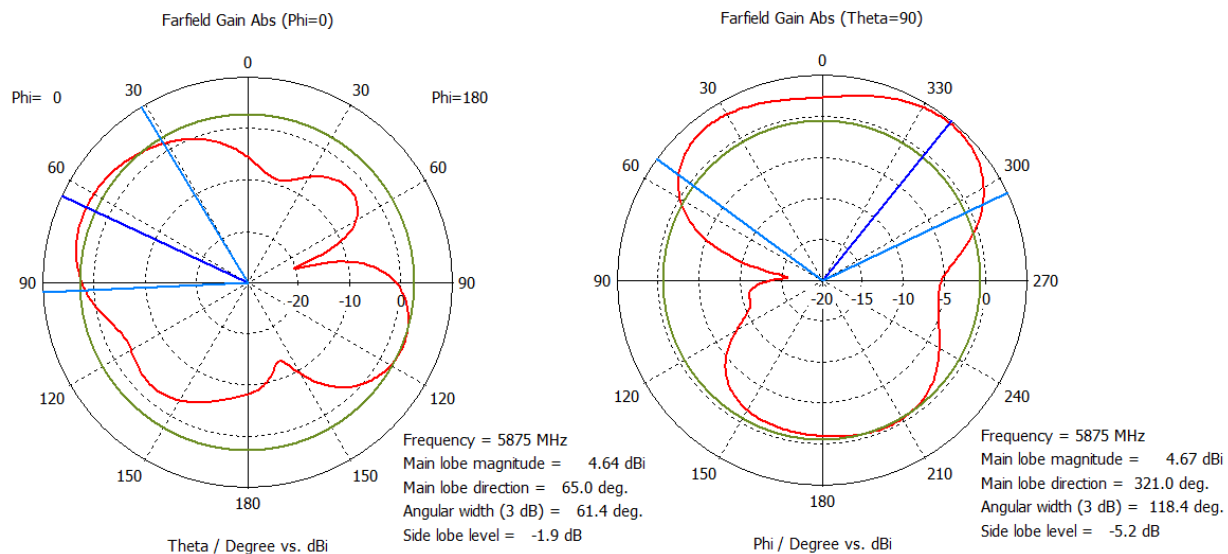
Obr. A.13: 3D vyžarovací diagram 5150 MHz (model č. 2)



Obr. A.14: Smerová charakteristika 5150 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 2)



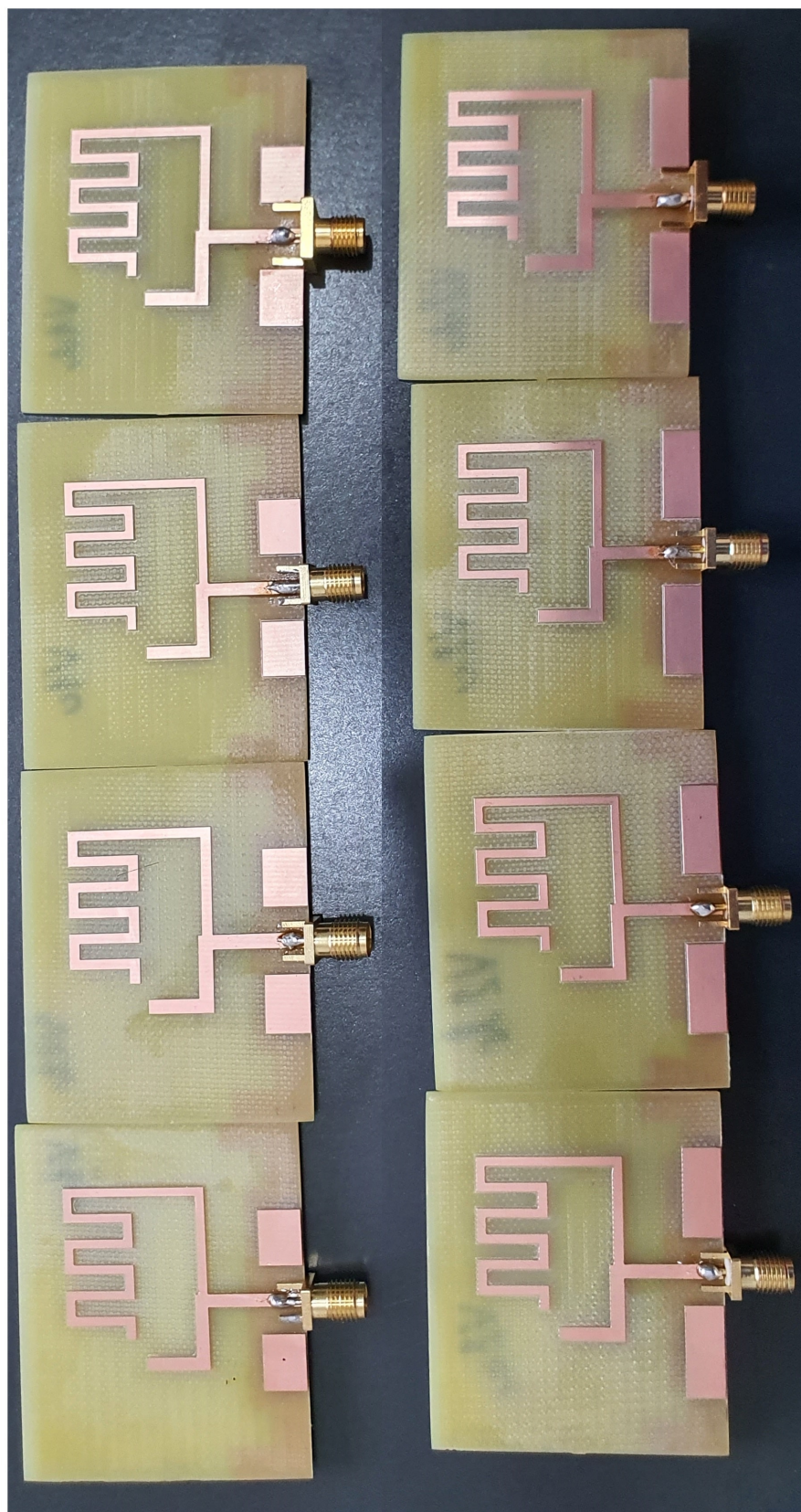
Obr. A.15: 3D vyžarovací diagram 5875 MHz (model č. 2)



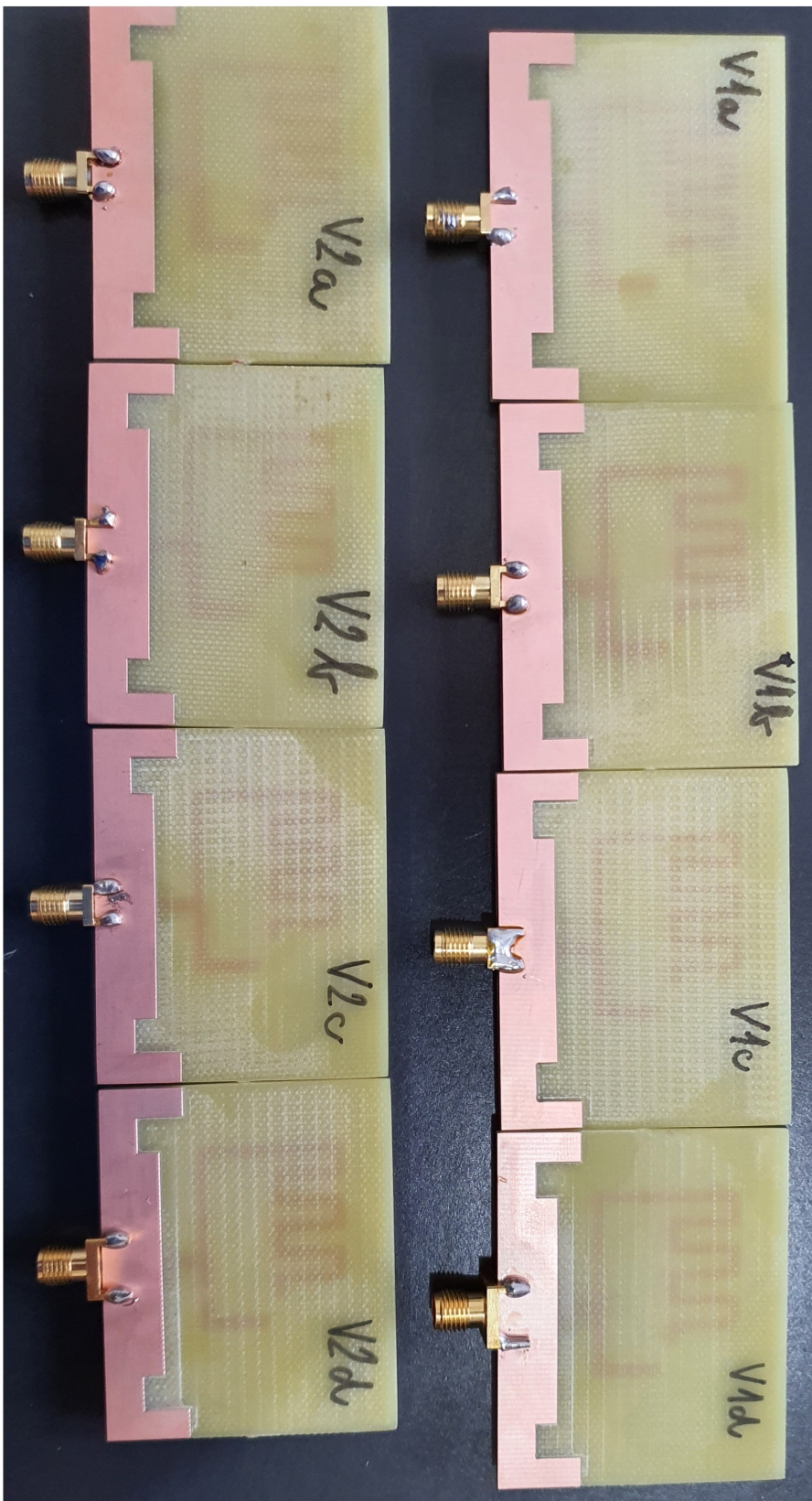
Obr. A.16: Smerová charakteristika 5875 MHz horizontálna/vertikálna (model č. 2)

Dodatok B

Dokončené modely antén



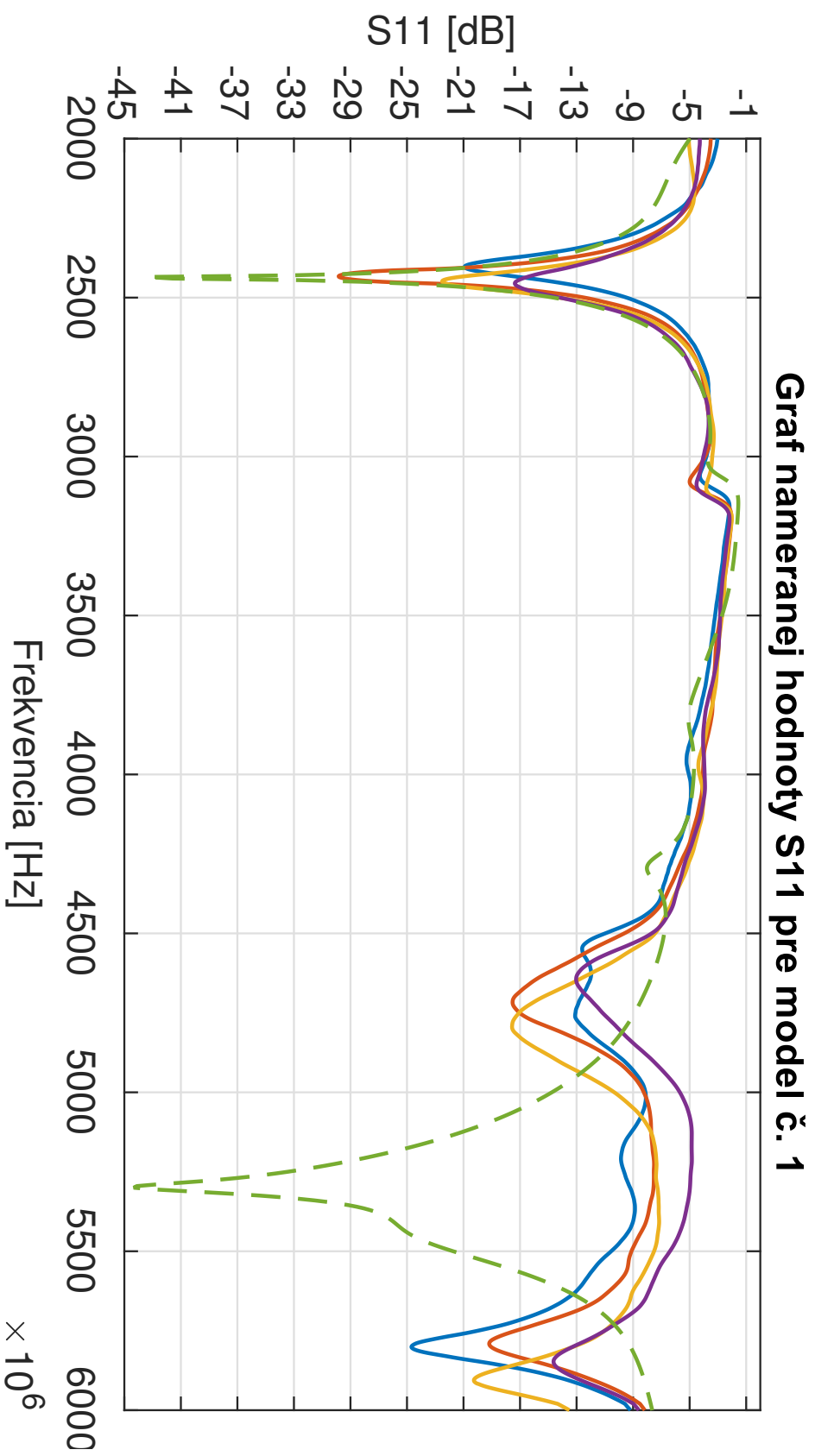
Obr. B.1: Modely pripravené na overenie meraní (horná časť antén)



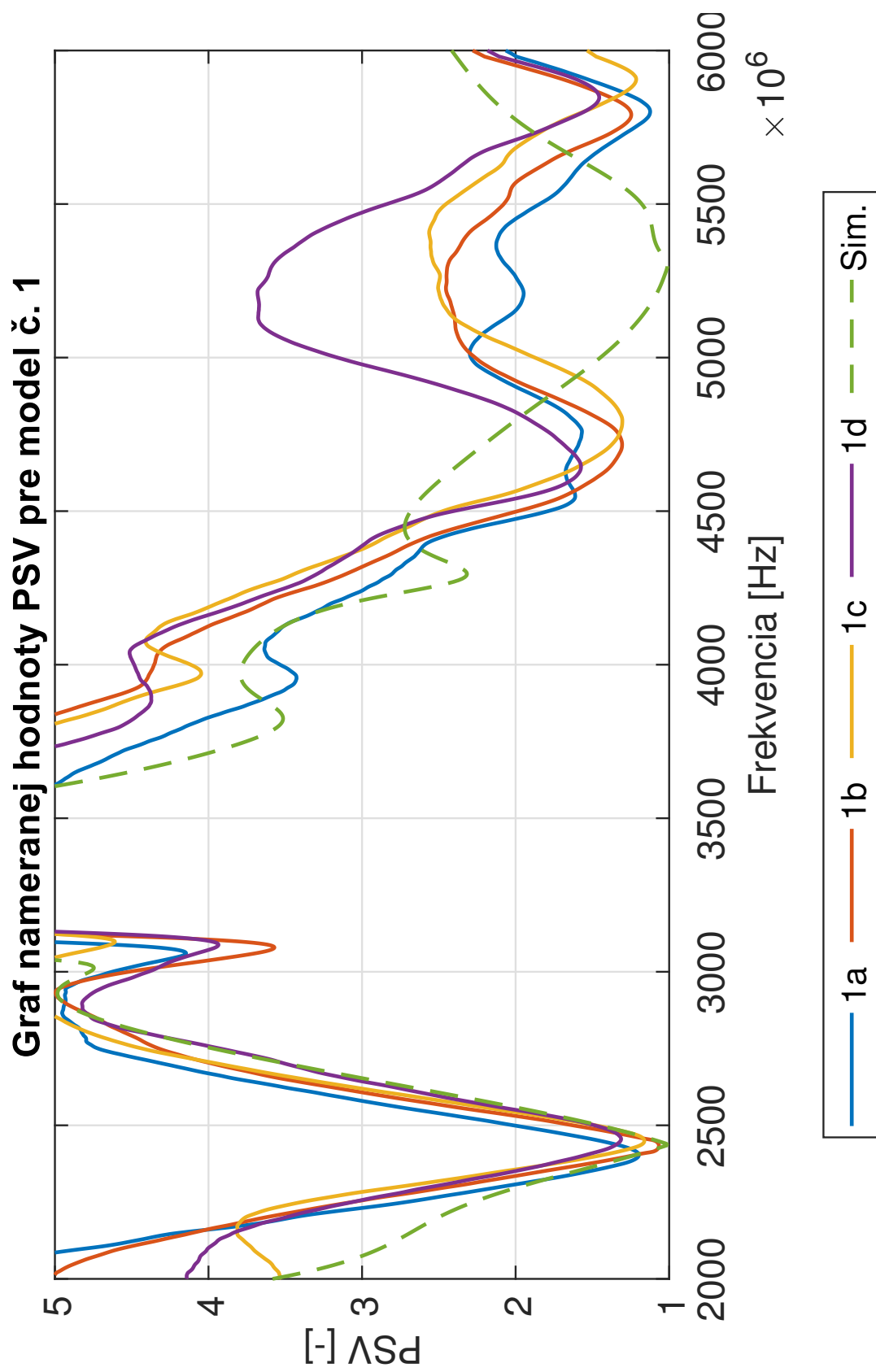
Obr. B.2: Modely pripravené na overenie meraní (dolná časť antén)

Dodatok C

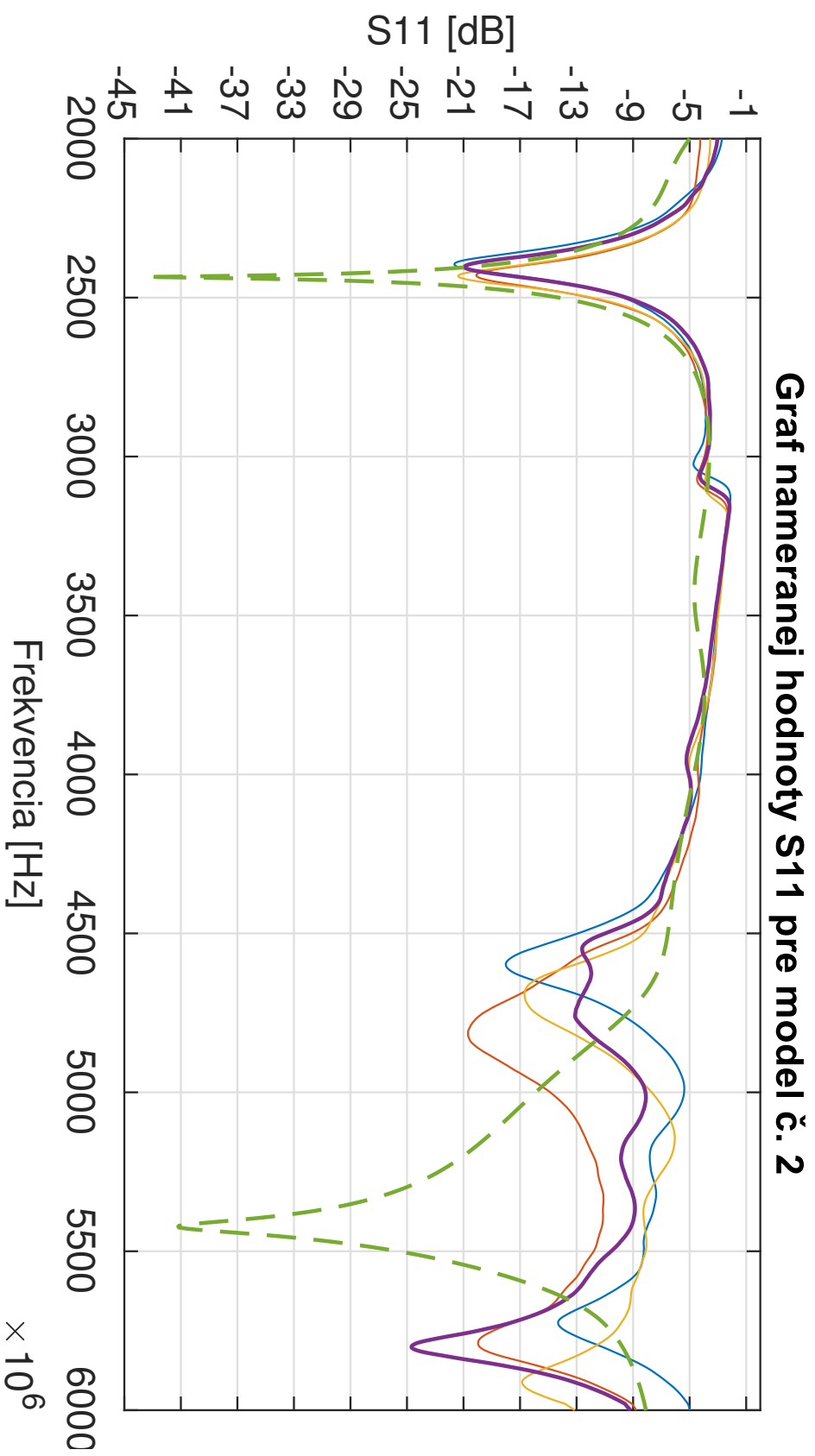
Grafy nameraných hodnôt



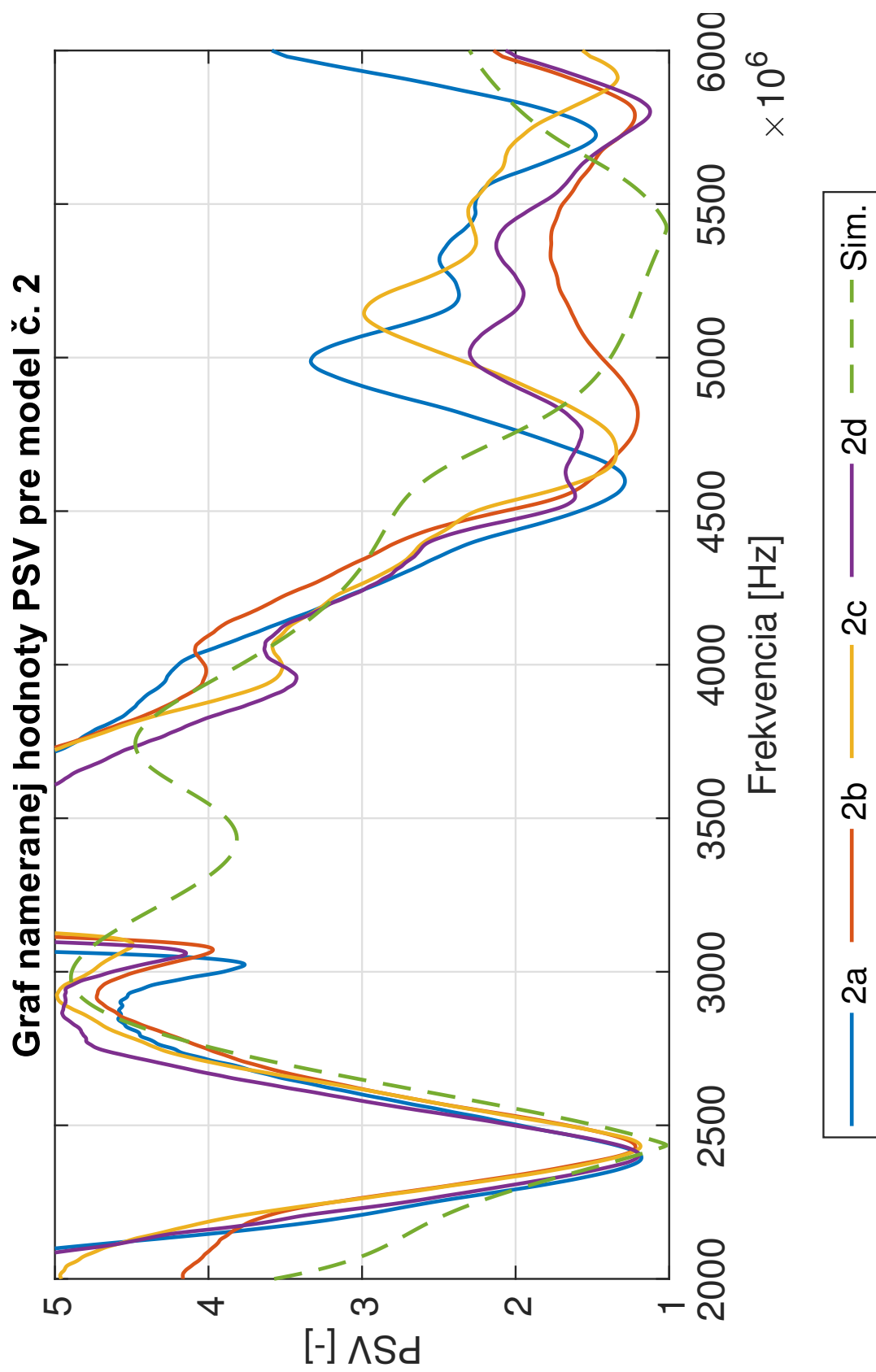
Obr. C.1: Graf nameranej hodnoty parametru S_{11} pre model č. 1



Obr. C.2: Graf nameranej hodnoty parametru PSV pre model č. 1



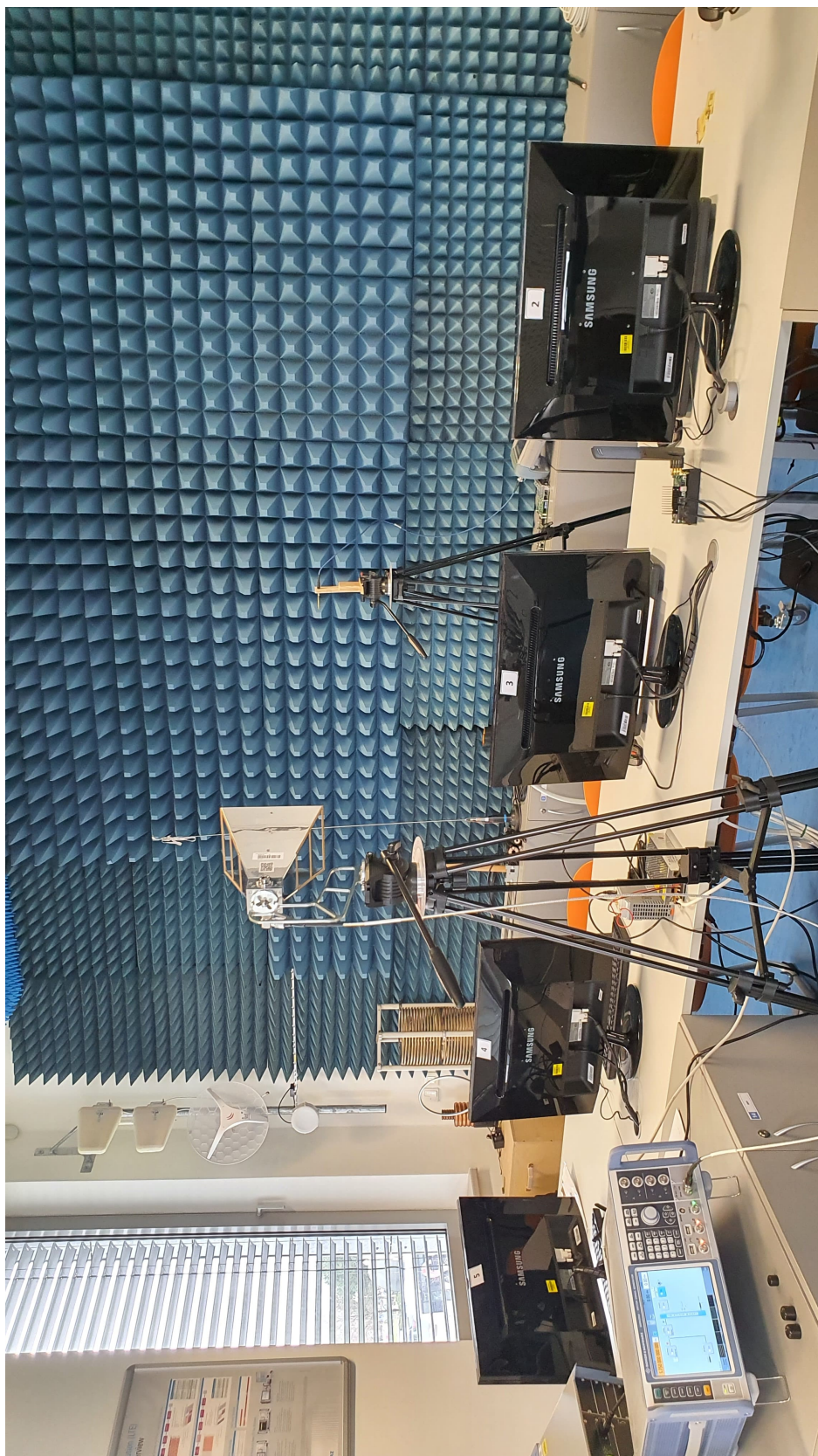
Obr. C.3: Graf nameranej hodnoty parametru S_{11} pre model č. 2



Obr. C.4: Graf nameranej hodnoty parametru PSV pre model č. 2

Dodatok D

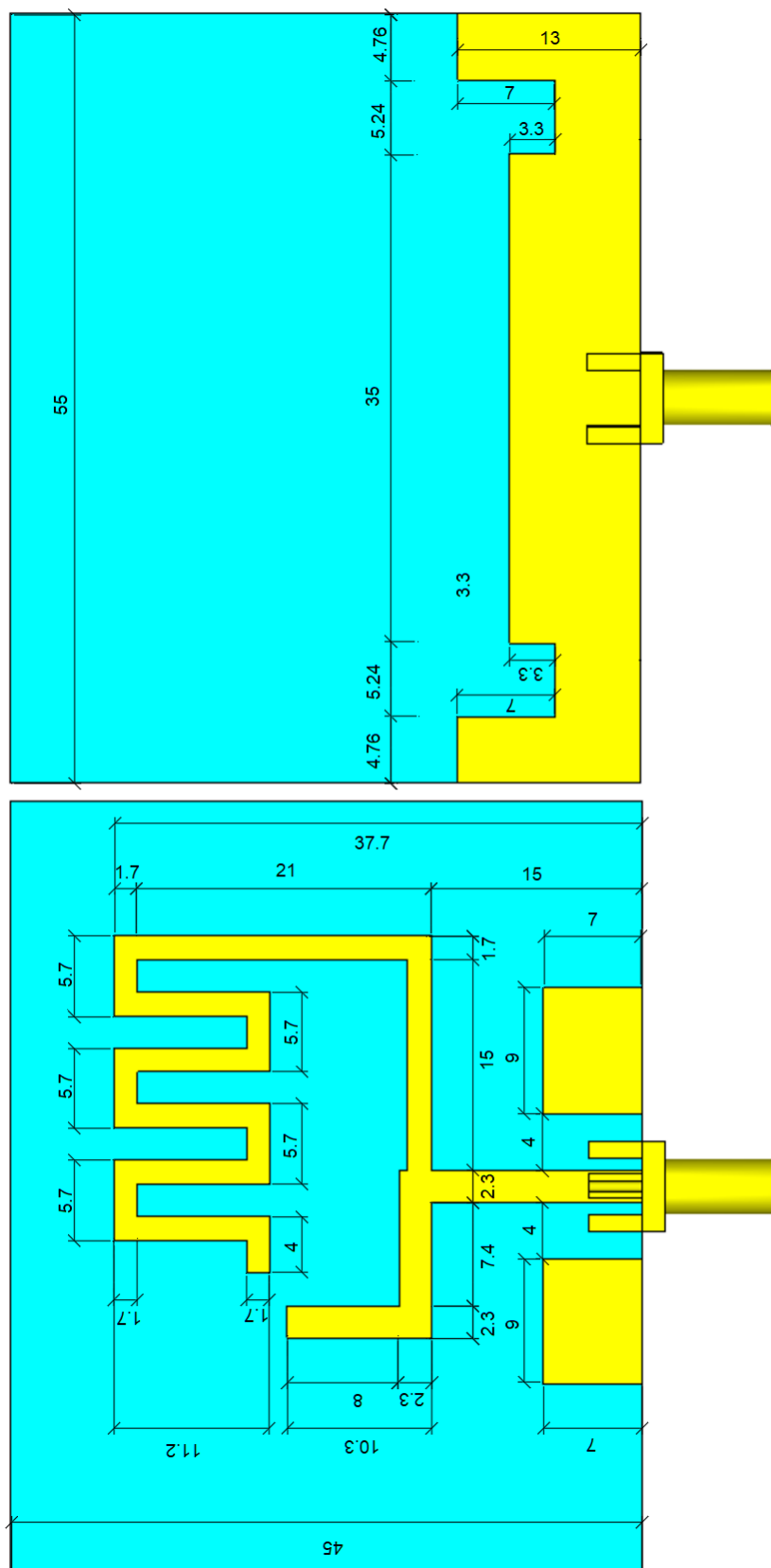
Meracie stanovisku zisku



Obr. D.1: Ukážka merania zisku

Dodatok E

Technický náčrt oboch modelov antén



Obr. E.1: Technický náčrt modelu č. 1

